

Türke, Christin; BI07w2-B

Erarbeitung der Grundlagen und eines Konzeptes für die  
Modellierung der Wachstumsdynamik und  
Schadstoffaufnahme von *Characeae*

eingereicht als

## **BACHELORARBEIT**

an der

HOCHSCHULE MITTWEIDA

---

UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik

Zwickau, August 2010

Erstprüfer: Prof. Dr. rer. nat. Dirk Labudde

Zweitprüfer: Dipl. Physiker Eiko Hermann

Drittprüfer: PD Dr. Hartmut Sängner

# Bibliographische Beschreibung

Türke, Christin

*Erarbeitung der Grundlagen und eines Konzeptes für die Modellierung der Wachstumsdynamik und Schadstoffaufnahme von Characeae* - 2010. - 103 Seiten

Mittweida, Hochschule Mittweida, Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik; Bachelorarbeit

2010

## Referat:

Ziel der Bachelorarbeit ist es, ein Simulationsprogramm für die Wachstumsdynamik und die Schadstoffaufnahme von *Characeae* (Armleuchteralgen) zu entwerfen. Das soll in Abhängigkeit von zwei Standorten erfolgen – optimaler und extremer Standort. Um die Biologie der Armleuchteralgen besser kennenzulernen, wird zunächst ein Literaturstudium absolviert und kurz zusammengefasst. Für die Modellierung wird das Simulationsprogramm *iThink*<sup>®</sup> verwendet. Im Folgenden werden die einzelnen Modellierungsschritte beschrieben, die Ergebnisse diskutiert, und es wird ein Ausblick über eine eventuelle Modellerweiterung gegeben.

# Inhaltsverzeichnis

Bibliographische Beschreibung

|   |    |
|---|----|
| Abbildungsverzeichnis.....  | I  |
| Tabellenverzeichnis.....  | IV |
| Diagrammverzeichnis.....  | V  |
| Abkürzungsverzeichnis .....   | VI |
| Danksagung.....   | 1  |
| 1 Motivation.....   | 2  |
| 2 Material und Methoden.....  | 3  |
| 2.1 Modellierung und Simulation.....  | 3  |
| 2.2 <i>Characeae</i> (Armleuchteralgen).....  | 8  |
| 2.2.1 Einführung in die Familie der <i>Characeae</i> .....  | 8  |
| 2.2.2 Verbreitung und abiotische Bedingungen .....  | 10 |
| 2.2.3 Arten der Gattung <i>Chara</i> .....  | 11 |
| 2.3 Passiv-biologische Anlage am Standort Pöhla.....  | 15 |
| 2.3.1 Untersuchung des Belages in der passiv-biologischen Anlage.....   | 19 |
| 2.3.2 <sup>226</sup> Radium .....   | 25 |
| 2.4 Simulationsprogramm <i>iThink</i> ® .....   | 27 |
| 3 Erstellung eines Konzeptes für die Modellierung der Wachstumsdynamik und<br>Schadstoffaufnahme von <i>Characeae</i> ..... | 30 |
| 3.1 Formulierung der benötigten Elemente mit einer Darstellung der<br>Modellkonzepte .....                                  | 30 |
| 3.1.1 Annahmen.....   | 33 |
| 3.1.2 Optimaler Standort (Modellkonzept AZA) .....  | 34 |
| i) Wachstumsbedingungen.....  | 36 |
| ii) Wassertemperatur.....   | 41 |
| iii) Zuwachs.....   | 42 |
| iv) Globalstrahlung .....   | 45 |
| v) Fotosyntheseparameter.....   | 51 |
| vi) Biomasseentwicklung von <i>Chara vulgaris</i> .....   | 54 |
| vii) Zufall einer Katastrophe in den Wintermonaten .....  | 54 |

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| viii) | Schadstoffeinlagerung in <i>Chara vulgaris</i> .....                     | 55  |
| 3.1.3 | Extremstandort (Modellkonzept PBA) .....                                 | 58  |
| i)    | Wachstumsbedingungen und Zuwachs .....                                   | 59  |
| ii)   | Fotosyntheseparameter und Globalstrahlung .....                          | 59  |
| iii)  | Belag auf <i>Chara vulgaris</i> .....                                    | 61  |
| iv)   | Biomasseentwicklung und Schadstoffeinbau von <i>Chara vulgaris</i> ..... | 63  |
| 3.2   | Ergebnis der Modellierung .....  | 64  |
| 3.2.1 | Allgemeines .....  | 64  |
| 3.2.2 | Ergebnisdiskussion des Modellkonzeptes AZA .....                         | 65  |
| 3.2.3 | Ergebnisdiskussion des Modellkonzeptes PBA .....                         | 78  |
| 3.2.4 | Ergebnisdiskussion beider Standorte .....                                | 85  |
| 4     | Mögliche Modellerweiterungen .....                                       | 88  |
| 5     | Bewertung des Arbeitsergebnisses .....                                   | 91  |
|       | Literaturverzeichnis Abbildungen .....                                   | 92  |
|       | Literaturverzeichnis Tabellen .....                                      | 93  |
|       | Literaturverzeichnis Gleichungen .....                                   | 94  |
|       | Anlagenverzeichnis .....   | 95  |
|       | Literaturverzeichnis .....   | 96  |
|       | Anlage 1 .....   | 102 |
|       | Anlage 2 .....   | 109 |
|       | Anlage 3 .....   | 110 |
|       | Anlage 4 .....   | 111 |
|       | Anlage 5 .....   | 113 |
|       | Anlage 6 .....   | 114 |
|       | Anlage 7 .....   | 115 |
|       | Anlage 8 .....   | 116 |
|       | Selbstständigkeitserklärung .....  | 117 |

# Abbildungsverzeichnis

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Abbildung 1  | Schritte einer Problemlösung.....  | 3  |
| Abbildung 2  | Simulationsprogramme.....  | 5  |
| Abbildung 3  | Standort Pöhla (Sachsen) [A] .....   | 15 |
| Abbildung 4  | Wasserführung der PBA Pöhla .....  | 16 |
| Abbildung 5  | Verschiedene mathematische Formulierungsmöglichkeiten der<br>Licht-Sättigungskurve in der Literatur .....                    | 20 |
| Abbildung 6  | Beziehung zwischen der Sauerstoffproduktionsrate und der<br>Bestrahlungsstärke.....  | 21 |
| Abbildung 7  | Brutto-Primärproduktion in Abhängigkeit von den ermittelten<br>Fotosynthese-Parametern und der Tagesbestrahlungsstärke ..... | 21 |
| Abbildung 8  | Chl a/ Carotinoid-Verhältnis verschiedener Proben .....  | 22 |
| Abbildung 9  | Respirationskoeffizient .....  | 23 |
| Abbildung 10 | Lichtkompensationspunkt und Lichtsättigungspunkt .....   | 23 |
| Abbildung 11 | Darstellung der Menü- und Tool-Leiste sowie der verschiedenen<br>Registerkarten in <i>iThink</i> ® .....                     | 27 |
| Abbildung 12 | Veranschaulichte Darstellung der Problematik .....   | 31 |
| Abbildung 13 | Darstellung der sechs Teilbereiche des Modellkonzeptes unter<br>optimalen Bedingungen.....                                   | 35 |
| Abbildung 14 | Abstufungsbewertung des Vektors <i>WISWasser_PBA</i> .....   | 39 |
| Abbildung 15 | Darstellung der Abstufungsbewertung in <i>iThink</i> ® .....   | 40 |
| Abbildung 16 | Beispiel einer Abstufungsbewertung bis hin zur Einschätzung des<br>Wachstumsfaktors.....                                     | 41 |
| Abbildung 17 | Darstellung des Zuwachses in <i>iThink</i> ® .....   | 43 |
| Abbildung 18 | Schalter für vier verschiedene Jahre ( <i>iThink</i> ®) .....  | 45 |
| Abbildung 19 | Strahlungsbereich in <i>iThink</i> ® .....   | 49 |
| Abbildung 20 | Darstellung der Wasser- und der Pflanzenzone.....  | 50 |
| Abbildung 21 | Darstellung der Fotosyntheseparameter in <i>iThink</i> ® .....   | 52 |
| Abbildung 22 | Darstellung des tatsächlichen Wachstums in <i>iThink</i> ® .....   | 53 |
| Abbildung 23 | Darstellung der Bildung der Biomasse in <i>iThink</i> ® .....  | 54 |

|              |  |    |
|--------------|--|----|
| Abbildung 24 | Darstellung des Zufalls einer Katastrophe in <i>iThink</i> ®.....  | 55 |
| Abbildung 25 | Darstellung der Schadstoffkonzentration in <i>iThink</i> ®.....  | 56 |
| Abbildung 26 | Schadstoffeinlagerung in <i>Chara vulgaris</i> .....   | 57 |
| Abbildung 27 | Darstellung der sieben Teilbereiche des Modellkonzeptes unter extremen Bedingungen .....                                       | 58 |
| Abbildung 28 | Darstellung der Bereiche Strahlung und Fotosynthese .....  | 60 |
| Abbildung 29 | Auswirkungen des Belages .....   | 62 |
| Abbildung 30 | Darstellung des Belages in <i>iThink</i> ® .....   | 63 |
| Abbildung 31 | Darstellung der Ergebnisprüfung (optimale Bedingungen) .....   | 64 |
| Abbildung 32 | Gewichteter WF (originale WIS der AZA).....  | 65 |
| Abbildung 33 | Gewichteter WF (enorme Reduzierung von $\text{HCO}_3^-$ ) .....  | 65 |
| Abbildung 34 | Nettofotosynthese der vierten Vegetationsperiode (1 PAR NOJ, 2 PAR NAJ, 3 PAR TJ).....   | 66 |
| Abbildung 35 | Darstellung der Assimilation und der Dissimilation in Abhängigkeit von der Strahlung.....                                      | 67 |
| Abbildung 36 | Vergleich Schattenstandort [1] und Lichtstandort [2] innerhalb der vierten Vegetationsperiode.....                             | 67 |
| Abbildung 37 | Zweigorientierung bei verschiedenen Lichtverhältnissen .....   | 68 |
| Abbildung 38 | Darstellung der Nettofotosyntheseleistung und der Biomasseentwicklung am Schattenstandort über sechs Vegetationsperioden ..... | 69 |
| Abbildung 39 | Biomasseentwicklung in Abhängigkeit der Max BM innerhalb der dritten Vegetationsperiode.....                                   | 70 |
| Abbildung 40 | Darstellung des Bereiches der gebildeten Biomasse während der ersten Vegetationsperiode.....                                   | 71 |
| Abbildung 41 | Darstellung der abgestorbenen Biomasse in Abhängigkeit von verschiedenen Sterbefaktoren.....                                   | 72 |
| Abbildung 42 | Auswirkungen eines veränderten Sterbefaktors auf die Biomasseentwicklung.....  | 73 |
| Abbildung 43 | Darstellung der abgestorbenen Biomasse im Vergleich zu der gebildeten Biomasse im Zeitraum von drei Jahren .....               | 74 |

|                     |   |    |
|---------------------|---|----|
| <i>Abbildung 44</i> | Darstellung der Schadstoffkonzentration ausgewählter Elemente (Na, Mg, Fe und <sup>226</sup> Ra).....   | 74 |
| <i>Abbildung 45</i> | Darstellung des Schadstoffeinkbaus in <i>Chara vulgaris</i> und der Biomasseproduktion in Bezug auf Eisen am optimalen Standort während der dritten Vegetationsperiode..... | 75 |
| <i>Abbildung 46</i> | Vergleich der abgestorbenen Biomasse mit der Schadstoffablagerung, bezogen auf die Elemente <sup>226</sup> Ra und Fe .....  | 76 |
| <i>Abbildung 47</i> | Vergleich der Schadstoffkonzentrationen der lebenden und toten Substanz .....   | 76 |
| <i>Abbildung 48</i> | Darstellung des Zufalls in der AZA (Zeitraum von 3 Jahren).....   | 77 |
| <i>Abbildung 49</i> | Gewichteter WF des Modellkonzeptes PBA.....   | 78 |
| <i>Abbildung 50</i> | Darstellung der Eisenablagerung [mm] und des Eisenvolumens .....  | 78 |
| <i>Abbildung 51</i> | Erläuterung der Belagbildung am Extremstandort.....   | 79 |
| <i>Abbildung 52</i> | Darstellung des Sedimentationsprozesses .....   | 80 |
| <i>Abbildung 53</i> | Vergleich der Auswirkungen bei veränderter Eisenkonzentrationen....   | 80 |
| <i>Abbildung 54</i> | Darstellung der Nettofotosynthese mit der Bewertung des Belages....   | 81 |
| <i>Abbildung 55</i> | Darstellung der Fotosynthesebewertung und der Wertung des tatsächlichen Wachstums.....  | 82 |
| <i>Abbildung 56</i> | Darstellung der BM und Pflanzenhöhe .....   | 82 |
| <i>Abbildung 57</i> | Schadstoffeinklagerung in <i>Chara vulgaris</i> .....   | 83 |
| <i>Abbildung 58</i> | Darstellung der Schadstoffaufnahme und -abgabe, der Schadstoffe in der Pflanze und der Schadstoffablagerung in Bezug auf die dritte Vegetationsperiode.....                 | 84 |
| <i>Abbildung 59</i> | Gegenüberstellung der Biomasse in der PBA und AZA (Beobachtungszeitraum 3 Jahre).....   | 85 |
| <i>Abbildung 60</i> | Gegenüberstellung der Schadstoffablagerung am Beispiel des Elementes <sup>226</sup> Ra und der abgestorbenen Biomasse beider Modellkonzepte .....                           | 87 |
| <i>Abbildung 61</i> | Regeln für eine Modellerweiterung auf eine Pflanzenkolonie von 1m <sup>2</sup> .....  | 88 |

## Tabellenverzeichnis

|            |   |    |
|------------|---|----|
| Tabelle 1  | Abiotische Standortansprüche von <i>Chara hispida</i> .....   | 11 |
| Tabelle 2  | Abiotische Standortansprüche von <i>Chara vulgaris</i> .....  | 12 |
| Tabelle 3  | Abiotische Standortansprüche von <i>Chara delicatula</i> .....  | 13 |
| Tabelle 4  | Abiotische Standortansprüche von <i>Chara contraria</i> .....   | 14 |
| Tabelle 5  | Autochthone Standorte der <i>Characeae</i> -Arten .....   | 17 |
| Tabelle 6  | Erläuterung der Bauelemente in <i>iThink</i> ® .....  | 28 |
| Tabelle 7  | Beprobung der autochthonen Standorte .....  | 34 |
| Tabelle 8  | Toleranzbereich von <i>Chara vulgaris</i> .....   | 36 |
| Tabelle 9  | Darstellung des Vektors der Dimension <i>WISWasser_PBA</i> .....  | 37 |
| Tabelle 10 | Darstellung der einzelnen Elemente, unterteilt in drei Gruppen.....   | 38 |
| Tabelle 11 | Übersicht über die Symptome eines Mangels und eines<br>Überschusses von ausgewählten Elementen.....                   | 38 |
| Tabelle 12 | Umrechnung der Rohdaten in eine fotosynthetisch relevante Größe<br>(NOJ 1994) .....                                   | 46 |
| Tabelle 13 | Schadstoffeinträger in der Pflanze.....   | 55 |
| Tabelle 14 | Übersicht über die WIS des Zulaufs und des Ablaufs der Becken 3/4.....  | 58 |
| Tabelle 15 | Annahmen bei der Bewertung der Nettofotosynthese .....  | 61 |
| Tabelle 16 | Wachstumsbewertung in Bezug auf die Belagdicke .....  | 62 |
| Tabelle 17 | Vergleich der Stoffkonzentration in der Trockenmasse von <i>Chara<br/>vulgaris</i> in Bezug auf die AZA und PBA ..... | 63 |
| Tabelle 18 | Ergebnisse der Modellkonzepte hinsichtlich der Radiumkonzentration<br>in <i>Chara vulgaris</i> .....                  | 83 |
| Tabelle 19 | Höhe der Pflanzen am Extremstandort .....   | 86 |
| Tabelle 20 | Höhe der Pflanzen am optimalen Standort.....  | 86 |
| Tabelle 21 | Mögliche Konkurrenten für <i>Chara vulgaris</i> .....   | 89 |



## Diagrammverzeichnis

|                   |  |    |
|-------------------|--|----|
| <i>Diagramm 1</i> | Temperaturlinearisierung.....                                | 41 |
| <i>Diagramm 2</i> | Temperaturlinearisierung mit Phaseneinteilung .....          | 42 |
| <i>Diagramm 3</i> | Zeitliche Darstellung der Hilfs-Converter.....               | 44 |
| <i>Diagramm 4</i> | Vergleich der Wetterdaten (NOJ 1994) mit <i>Walsby</i> ..... | 47 |
| <i>Diagramm 5</i> | Vergleich der Wetterdaten (NAJ 2002) mit <i>Walsby</i> ..... | 47 |
| <i>Diagramm 6</i> | Vergleich der Wetterdaten (TJ 2003) mit <i>Walsby</i> .....  | 48 |
| <i>Diagramm 7</i> | Idealtagesgangswerte von <i>Walsby</i> .....                 | 48 |
| <i>Diagramm 8</i> | Attenuation und Transmission (AZA) im Vergleich.....         | 50 |
| <i>Diagramm 9</i> | Fotosynthesebewertung in <i>iThink</i> <sup>®</sup> .....    | 53 |

## Abkürzungsverzeichnis

|                   |   |   |
|-------------------|---|---|
| $^{226}\text{Ra}$ | - | Radium-226  |
| AZA               | - | Anzuchtanlage   |
| BM                | - | Biomasse  |
| Chl a             | - | Chlorophyll a   |
| DIC               | - | dissolved organic carbon (gelöster organischer Kohlenstoff) |
| DWD               | - | deutscher Wetterdienst                                      |
| LfULG             | - | Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie           |
| MaxBM             | - | maximale Biomasse   |
| NOJ               | - | Normaljahr  |
| NAJ               | - | Nassjahr  |
| OS                | - | Oospore   |
| PAR               | - | Photosynthetically Available Radiation                      |
| PBA               | - | Passiv-Biologische Anlage                                   |
| PS                | - | Prozentsatz   |
| R                 | - | Respiration (Atmung)  |
| SD                | - | Schichtdicke  |
| TJ                | - | Trockenjahr   |
| TS                | - | Trockensubstanz   |
| WIS               | - | Wasserinhaltsstoffe   |
| WF                | - | Wachstumsfaktor   |
| WG                | - | Wachstumsgröße  |
| ZR BM             | - | Zuwachsrate Biomasse  |
| ZR OS             | - | Zuwachsrate Oospore   |

## Danksagung

Für die Unterstützung zur Bearbeitung meines Themas möchte ich allen danken, die mir mit Rat und Tat zur Seite standen. Besonders für die Grundlagen der biologischen Eigenschaften von *Characeae* möchte ich Herrn *Prof. Henrik Schubert* und Herrn *Ronny Marquardt* der Universität in Rostock meinen Dank aussprechen. Mein Dank bezüglich der Modellierung und Simulation mit *iThink*<sup>®</sup> gilt *B.P.S. Engineering GmbH*, besonders Herrn Hermann. Auch Herrn *Dr. Sänger* möchte ich für die zahlreiche zur Verfügung gestellte Literatur danken.

# 1 Motivation

In unserem Studium haben wir nur sehr wenig über Makrophyten und deren spezielle Unterarten erfahren. Umso wichtiger schien es mir, diese Lücke schließen zu helfen. *Characeae* (Armleuchteralgen) dienen der Bioindikation von Gewässern. Die ältesten Nachweise in Sachsen gehen bis 1773 (Schulze, 1773) zurück. Ab der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden die Untersuchungen bezüglich der *Characeae* allerdings eingestellt. Dadurch gerieten sie nach und nach in Vergessenheit. Erst seit Anfang des 20. Jahrhunderts versuchte man, die Wissenslücke wieder mit einigen Publikationen zu schließen. Genauere Untersuchungen finden jedoch erst seit zehn bis fünfzehn Jahren wieder statt. Dadurch geht dieser Vorgang „schleppend“ voran und benötigt viel Zeit und Geduld. Diese Arbeit soll dem Leser Erkenntnisse und Wissen über die *Characeae* in Gewässern näher bringen und die spärlich vorhandene Literatur in einigen wichtigen Punkten zusammenfassen. Außerdem soll ein erstes Modellkonzept für ihre Wachstumsdynamik und ihre Schadstoffaufnahme erstellt werden.

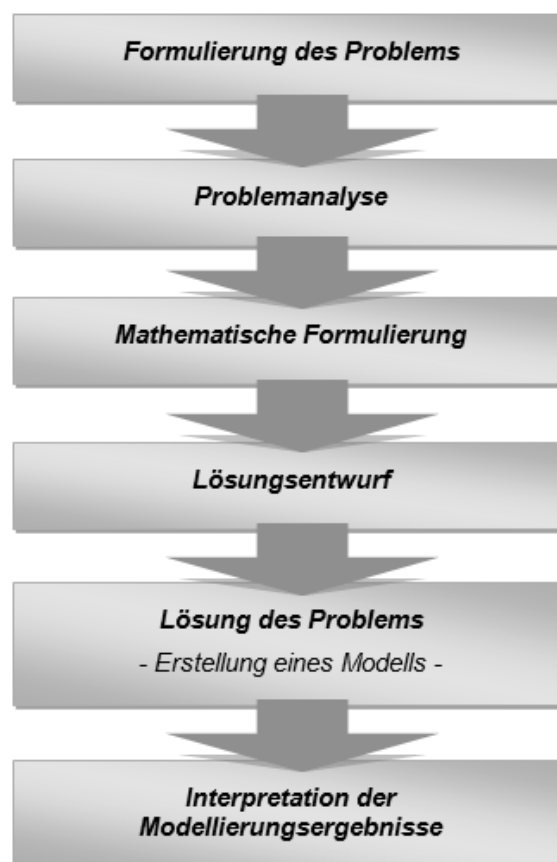
Doch warum erarbeite ich ein solches Modellkonzept? Natürlich muss ein langer Weg beschritten werden, bevor der erste Entwurf in eine benutzerfreundliche Modellumgebung umgesetzt werden kann. Das ist nicht Ziel dieser Arbeit. Besonderes Augenmerk soll auf eine erste Grundsteinlegung gerichtet werden, sodass eine Basis für eine weitere Bearbeitung bis hin zur Fertigstellung des Modells geschaffen werden kann. Am Ende soll ein Programm mit einer benutzerfreundlichen Oberfläche existieren, sodass in naher Zukunft Personen damit arbeiten können, die ohne jedes Risiko bereits am Computer eine eventuelle Etablierung bestimmter Arten von *Characeae* an verschiedenen autochthonen Standorten prüfen wollen. Dabei wird die Vorkenntnis der gegebenen abiotischen Bedingungen benötigt. Ein weiterer Kenntnisstand, wie etwa biologische Prozesse oder Verknüpfungen zwischen einzelnen Elementen, ist nicht mehr notwendig.

Christin Türke – Zwickau, August 2010

## 2 Material und Methoden

### 2.1 Modellierung und Simulation

Die Grundlagen für eine mathematische Modellierung eines realen Problems stammen meist aus der Industrie, der Wirtschaft oder aus dem naturwissenschaftlichen Bereich. Hierbei soll vor allem der Grundgedanke formuliert und erörtert werden. Die Wege der Lösung eines Problems können dabei unterschiedlichen Charakter haben. Doch meist folgen Modellierungen dem gleichen Problemlösungsprinzip (*Abbildung 1*).



**Abbildung 1** Schritte einer Problemlösung

Der Formulierung des Problems folgt eine exakte Erläuterung des realen Problems. Dieser Schritt steht in engem Zusammenhang mit der Problemanalyse. Hier werden zunächst alle relevanten Daten ausgewählt, identifiziert und letztlich auf die Möglichkeiten einer Problemlösung geprüft. Anschließend folgt die mathematische Formulierung. Dabei werden Größenordnungen von bestimmten Parametern und Variablen festgelegt und gegebenenfalls noch Vereinfachungen vorgenommen. Der Formulierung schließt sich der erste Lösungsentwurf an. Die Vorgehensweise teilt sich in zwei Möglichkeiten. Der erste Lösungsweg beschreibt eine „Top-Down-Strategie“,

bei dem das Problem in einzelne Teilprobleme zerlegt wird und sich aus ihrer Lösung die Gesamtlösung der Fragestellung ableitet. Der zweite Lösungsweg beschäftigt sich mit einer „Bottom-Up-Strategie“. Hierbei besteht das Problem aus mehreren Teilproblemen. Diese werden zusammengefügt, um schließlich eine Gesamtlösung zu generieren. Nachdem das Problem strukturiert ist, kann ein Modell zur Lösung der Fragestellung erstellt werden. Hierbei müssen die analysierten Daten in Form von geeigneten Variablen und Parametern geschickt in das Modell eingebaut werden und Beziehungen zwischen ihnen hergestellt werden. Auch statistische oder reale Annahmen müssen getroffen werden, damit verschiedene Parameter dynamisch simuliert werden können. Das Ergebnis einer solchen Modellierung kann durch unterschiedliche Prüfmethode genähestens untersucht werden, wie etwa die Prüfung von bestimmten Grenzwerten. Der Modellerstellung schließt sich eine Interpretation der Ergebnisse an. Fragen können dem eine große Hilfestellung geben. Stimmt das Modellergebnis mit der zu erwartenden Lösung überein? Können die Ergebnisse in der Natur oder durch geeignete Experimente nachgeprüft werden? (Prof. Dr. rer. nat. Labudde, 2009)

Allgemein wird die Natur durch eine Modellierung mit zahlreichen Einschränkungen und Zielsetzungen abgebildet und anschließend in einem Modell simuliert. Bei der Erstellung eines Modells können nicht alle Parameter und Einflussgrößen berücksichtigt werden, sodass nur eine gewisse Annäherung an die tatsächlichen Ereignisse in der Natur erfolgt. So sind bei einer Modellierung zeitabhängige Prozesse mit unüberschaubaren oder sehr komplexen Zusammenhängen miteinander zu verknüpfen. Viele Teilprozesse in der Natur sind dabei untereinander verbunden und beeinflussen sich gegenseitig. Außerdem sind für unterschiedliche Zielgrößen Prognosen und Informationen über die Entwicklung erforderlich. Die Problemlösung in einem Simulationsprogramm geschieht durch die Aufstellung von einem oder mehreren Differenzialgleichungssystemen. Diese sind zum Teil nicht mehr geschlossen lösbar. So stehen prinzipiell zwei Möglichkeiten zur Lösung für das Problem zur Verfügung:

1. Eine numerische Lösung des Differenzial-Gleichungssystems (bei jeder Modellerweiterung muss neu begonnen werden);
2. Der Übergang von einem Differenzial-Gleichungssystem ( $dt$ ) zu einem Differenzen-Gleichungssystem ( $\Delta t$ ) und einer Modellierung durch Simulation;

Die zweite Möglichkeit wird beispielsweise beim zeilenweisen Rechnen in EXCEL<sup>®</sup> angewendet. Jede Zeile ist dabei ein Zeitabschnitt. Das Ergebnis der Zeile  $n$  ist gleichzeitig der Startpunkt der Zeile  $n+1$ .

Die Modellierung mit einer Simulationssoftware ist die effektivste Möglichkeit, um dynamische Modelle numerisch zu modellieren. So kann der Benutzer selbstständig Modelle erstellen und mit diesen unter unterschiedlichen Bedingungen Simulationen durchführen. Simulationsprogramme die hierfür genutzt werden können, sind in *Abbildung 2* dargestellt. (Hermann & Jobski, 2010)

|   |
|---|
| <b><i>iThink/STELLA</i></b> ( <i>iseesystems</i> )        |
| <b><i>Vensim</i></b> ( <i>Ventana Systems</i> )           |
| <b><i>Powersim</i></b> ( <i>PowerSim</i> )                |
| <b><i>GoldSim</i></b> ( <i>GoldSim Technology Group</i> ) |
| <b><i>Consideo Modeler</i></b> ( <i>Consideo GmbH</i> )   |

**Abbildung 2** Simulationsprogramme

Eine Erläuterung des Simulationsprogramms *iThink®/Stella* erfolgt in *Abschnitt 2.4*.

*Vensim®* ist ein Simulationsmodell, ausgelegt für die Wirtschaft, die Wissenschaft und für soziale Systeme. Dieses Programm bietet unterschiedliche Anwendungszweige (Ventana Systems, Inc., 2010):

- Data: Verständnis und Interpretation von Datensätzen
- Geschäft: Die Balance zwischen Businessfunktionen innerhalb einer Organisation im Laufe der Zeit
- Industrie: Wachstum und Veränderung eines Unternehmens
- Logistik
- Makroökonomie: Treiben und Auswirkungen des Wirtschaftswachstums
- Marketing
- Politik: Auswertung und Ergebnisse der Regierungspolitik
- Produktion: Fabrik- und Zuliefererprozesse
- Projekt Management: Projektkosten, Qualität und Zeit bis zur Fertigstellung

*Powersim®* beschäftigt sich einerseits mit der Erforschung von Zukunftsszenarien für Unternehmen, beispielsweise mit einer Risikobewertung oder einer Untersuchung verschiedener strategischer Richtungen. Andererseits können mit diesem Programm

Live-Demonstrationen, wie etwa Umweltverseuchungen, vorgenommen werden. Das ist bis jetzt allerdings nur in Norwegen erprobt. Hier können die Notfallversorgung und die Sicherheit der Bevölkerung untersucht werden. Dementsprechende Maßnahmen können eingeleitet und ein Notfallplan kann erstellt werden. Dieses Simulationsprogramm ist für biologische Systeme und Stofftransporte wenig geeignet (Powersim Software AS).

*Goldsim*<sup>®</sup> ist eine Software für eine dynamische Modellierung komplexer Systeme in Wirtschaft, Technik und Wissenschaft. Hier können Entscheidungen und Risikobewertungen durch die Simulation mit allen Unsicherheiten und Risiken in komplexen Systemen durchgeführt werden. *Goldsim*<sup>®</sup> bietet eine leistungsstarke und flexible Plattform für die Visualisierung und die Simulation, wobei die Modellerstellung buchstäblich durch die Zeichnung von Bildern erfolgt. Es gibt insgesamt vier verschiedene Angebote von *Goldsim*<sup>®</sup>:

- *Goldsim*<sup>®</sup> *Pro*: Stellt eine kommerzielle Version dar, worin alle grundlegenden Funktionen enthalten sind.
- *Goldsim*<sup>®</sup> *Research*: Ist ein Angebot mit reduziertem Preis für Dozenten und Studenten an Hochschulen. Diese Version ist nicht für den Einsatz von privaten oder staatlich geförderten Forschungseinrichtungen vorgesehen. Die Funktionen von *Goldsim*<sup>®</sup> *Pro* sind ohne Einschränkungen enthalten.
- *Goldsim*<sup>®</sup> *Academic*: Diese Version ist kostenlos verfügbar und ist ein Angebot für akademische Nutzer (Studenten, Professoren, Dozenten) für lehr- bzw. nicht-studentische Forschungszwecke. Aus diesem Grund sind die Funktionen von *Goldsim*<sup>®</sup> *Pro* limitiert auf Modelle mit weniger als fünfhundert Elementen.
- *Goldsim*<sup>®</sup> *Player*: Dieser Player steht als kostenloser Download zur Verfügung, um alle *Goldsim*<sup>®</sup> Modelle zeigen zu können. Hier wird dem Nutzer allerdings nicht erlaubt, neue Modelle zu erarbeiten oder zu bearbeiten.

Aus diesen vier Versionen kann der Nutzer sein spezifisches *Goldsim*<sup>®</sup>-Paket kreieren. Auswählen kann er dabei aus fünf verschiedenen Anwendungsbereichen



(Finanzierungs-Modul, Zuverlässigkeits-Modul, Stofftransport-Modul, Verarbeitungs-Modul, Autoren-Modul) (GoldSim Technology Group, 2010).

*Consideo-Modeler*<sup>®</sup> ist eine Software deutschen Ursprungs. Sie wird in drei unterschiedliche Bereiche eingeteilt:

- *Consideo-Process-Modeler:* Ereignisorientierte Analyse von Projekten und Prozessen mit den „Was-Wäre-Wenn“-Szenarien. Hier werden keine Formeln für die Modellierung benötigt.
- *Consideo-Bi-Modeler:* Daten können in Szenarien betrachtet werden.
- *Plato AG – DRBFM-Modeler:* Diese Version ist für Experten aus dem Qualitätsmanagement geeignet.

Die DEMO-Versionen von allen drei Modellen beschränken sich auf zwanzig Faktoren. Außerdem ist keine Speicherfunktion vorhanden, der Export von Daten funktioniert nicht, und ein Upgrade ist ebenfalls nicht möglich. Allerdings sind alle DEMO-Versionen kostenlos verfügbar (CONSIDEO GmbH, 2010).

## 2.2 *Characeae* (Armleuchteralgen)

### 2.2.1 Einführung in die Familie der *Characeae*

*Characeae* (auch Armleuchteralgen genannt) sind eine spezielle Gruppe von Wasserpflanzen – genauer gesagt, „submers lebende makrophytische grüne Algen“ (Krause, 1997). Insgesamt bestehen Armleuchteralgen weltweit aus 6 Gattungen und ca. 200 Arten. Die wichtigsten Gattungen sind *Chara*, *Nitella* und *Tolypella*. *Characeae* sind Bioindikatoren für Gewässer, das heißt, sie können oligotrophe bis mesotrophe Gewässer anzeigen.

Die *Characeae* bestehen aus Knoten (Nodien), Stengelgliedern (Internodien) und Ästen (Quirläste). Die Quirläste setzen sich aus Nodien und Internodien zusammen und tragen gleichzeitig das Blättchen und die Gametangien (Fortpflanzungsorgan). Der deutsche Name „Armleuchteralge“ entstand aufgrund der Anordnung der Äste und der Knoten, ähnlich der eines „Kronleuchters“. Die Nährstoffbindung und –aufnahme aus der Umgebung erfolgt über Rhizoide (Krause, 1997).

Die *Characeae* haben eine Art Exoskelett aus Kalk, welches ca. 60% der Trockenbiomasse ausmacht (Van den Berg et al., 2002). Diese Kalkablagerungen sind eine Folge der Assimilation, wobei körperfremde Stoffe unter Energiezufuhr in körpereigene Stoffe umgewandelt werden. Das gelöste Bicarbonat  $\text{HCO}_3^-$  wird in die Pflanze aufgenommen und durch die Fotosynthese, mit Licht als Energiequelle, in Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) umgewandelt. Das entstandene  $\text{CaCO}_3$  wird in die äußere Zellwand eingelagert (Stroede, 1933). Diesen Vorgang nennt man Inkrustation – ein Schutzmechanismus gegen zu große mechanische Einflüsse, weshalb die *Characeae* auch als Kalktuffbildner bezeichnet werden (Krause, 1997). Für die Umwandlung des Bicarbonates ist ein Enzym namens *Carbonhydrase* zuständig. Der Mechanismus ist bei den Armleuchteralgen allerdings noch relativ unerforscht. Es fehlt zum Beispiel die Erkenntnis, ob  $\text{HCO}_3^-$  intra- oder extrazellulär umgeformt wird. Da *Characeae* entweder  $\text{HCO}_3^-$  oder  $\text{CO}_2$  als Kohlenstoffquelle nutzen können, kann trotz dieser Wissenslücke die Aussage getroffen werden, dass die Aufnahme des Bicarbonates in einer niedrigeren maximalen Wachstumsrate erfolgt als die Aufnahme von  $\text{CO}_2$ . Ersteres erfolgt bei einem hohen pH-Wert im Bereich der Pflanzenoberfläche. Die Bicarbonatkonzentration bleibt innerhalb eines Jahres nicht konstant. Der Abfall hängt von der Entwicklungsrate im Frühling in Kombination mit einer hohen  $\text{CaCO}_3$ -Verkrustung zusammen (Van den Berg et al., 2002).

Die Reproduktion kann sowohl über vegetative als auch über generative Fortpflanzung erfolgen. Erstere resultiert aus einer Brutknollenbildung ( $\varnothing$  0,5-5mm), wobei das primäre Ziel die Überwinterung darstellt. Die generative Fortpflanzung erfolgt über Samen oder Sporen (Riza Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, 1999). Dementsprechend haben *Characeae* weibliche (Oogon – Bildung von Eizellen) und männliche Gametangien (Antheridium – Bildung spermatogener Fäden). Nach der Befruchtung verfestigt sich die aus der Eizelle gebildete Zygote zu einer Oospore. Die Oosporen sind gegen Temperaturschwankungen und Austrocknung nahezu unempfindlich und können nach einer kurzen oder langen Ruhephase wieder auskeimen. Diese variieren sowohl in Farbe, Art und Alter, als auch der Menge der Kalkablagerung (Riza Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment, 1999). Aus einer Oospore entwickelt sich so eine neue Pflanze, die sowohl einjährig (Erneuerung über Oosporen) als auch mehrjährig in Seen ausdauern kann (Krause, 1997).

Über die Rhizoide sind die *Characeae* selbst in der Lage, ihr eigenes Milieu im Sedimentbereich zu bilden. Das erfolgt durch die abgelagerte abgestorbene Biomasse auf dem Boden, mit deren eigenen speziellen Organik. So sind *Characeae* nicht vorwiegend von der Beschaffenheit des Sedimentes abhängig und können sich ihre eigene Grundlage für bestmögliches Wachstum schaffen.

### 2.2.2 Verbreitung und abiotische Bedingungen

Die *Characeae* wachsen in der gemäßigten Klimazone und verbreiten sich hauptsächlich im Tiefland, können aber auch in höhere Gebiete vordringen. So sind sie in der Lage, Gewässer natürlichen oder anthropogenen Ursprungs zu besiedeln – wie etwa Baggerseen, Quellbäche, Süßwasserseen, Brackwasserlagunen, Gräben oder wassergefüllte Wagenspuren. Weiterhin bevorzugen sie eher feinsandige bis schlammige Substrate, da ihre Rhizoide dort besser eindringen können. Die *Characeae* sind Pionierpflanzen, die in Gewässern eher auftreten als Blütenpflanzen (Krause, 1997). „Der Abstieg vom Pionier- zum Altersstadium eines *Characeae*-Bestandes dauert in kurzlebigen Kleingewässern ein Jahr, in Seen Jahrhunderte“ (Krause, 1997, S. 49).

Negativ auf das Wachstum der *Characeae* wirken sich Wasserspiegelschwankungen aus. Auch Konkurrenzkampf (siehe *Abschnitt 4*) und zu große mechanische Einflüsse (z.B. Wellen) sind schädlich. Daher meiden sie strömendes Wasser sowie das freie Meer und sind deshalb an ruhig fließenden Quellen und Bächen nachweisbar. Wenn die Bedingungen optimal sind, können die Armleuchteralgen an autochthonen Standorten bis in große Tiefen vordringen (bis 60m). Den Limitierungsfaktor stellt hier das Licht dar. Aber auch die Temperatur kann zu einer Tiefenlimitierung führen. Die Beziehungen zwischen der Beleuchtungsstärke und der maximal erreichbaren Tiefe ist abhängig vom Ort und von den physikalischen Parametern im Wasser. Tiefenschichtung und Sauerstoffmangel bestimmen die Bereiche, in denen sie noch wachsen können. Gelöster organischer Kohlenstoff kann gegebenenfalls das Wachstum beeinflussen (Schwarz et al, 2002). Da *Characeae* photoautotrophe Organismen sind, wird Licht zur Energiegewinnung benötigt. Dieser Vorgang wird durch die Fotosynthese beschrieben. Die *Characeae* besitzen zwar einen großen Lichtanspruch, aber auch eine hohe Schattentoleranz (Bonis & Grillas, 2002).

Hartes Wasser mit einer hohen Alkalinität begünstigt das Wachstum von *Characeae*. Hierbei können Unterschiede zwischen den einzelnen Gattungen auftreten. Die Gattung *Chara* favorisiert beispielsweise eher größere Konzentrationen an Calciumionen ( $\text{Ca}^{2+}$  - verantwortlich für die Wasserhärte) als *Nitella*. Das Calciumvorkommen steht dabei immer in Verbindung mit dem Vorkommen von Bicarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) – dem gelösten organischen Kohlenstoff (DIC). Die *Characeae* haben eine große Affinität gegenüber dem Bicarbonat, wodurch mehr assimiliert werden kann.

### 2.2.3 Arten der Gattung Chara

In diesem Abschnitt werden alle Arten näher erläutert, die auch in der passiv-biologischen Anlage am Standort Pöhla zum Einsatz kommen. Dabei wird vor allem auf die Standortansprüche und auf die Verbreitungsgebiete näher eingegangen. Die Tabellen verdeutlichen die zu vertragenden Toleranzbereiche der jeweiligen Art.

**Chara polyacantha** ist eine mittelgroße bis große Algenpflanze mit einer Achsenlänge von bis zu 110cm. Nicht selten ist nur ein Geschlecht vorhanden – das Oogon mit einer dicken Kalkhülle. *Chara polyacantha* kann in drei Wuchsformen auftreten:

- 1. Höhe: bis 30cm
- 2. Höhe: von 20 bis 50cm
- 3. Höhe: mit einer Internodienlänge von 14cm und einer Astlänge von 8cm

Diese Armleuchteralgen-Art kommt in zehn bis zwanzig Metern Tiefe vor und zählt zu den gefährdeten Arten (Krause, 1997). Zu *Chara polyacantha* liegen keine Angaben bezüglich abiotischer Standortansprüche in Stroede vor (Stroede, 1933).

**Chara hispida**, auch „streifhaarige Armleuchteralge“ genannt (Just & Krause, 2008), ist eine der größten und kräftigsten Art der Gattung Chara. Sie kann bis zu 200cm hoch werden und kommt ab einer Wassertiefe von 0,5m vor. Das Verbreitungsgebiet von *Chara hispida* sind kalkreiche Gewässer und Mineralböden mit einem hohen organischen Anteil. Flächendeckend siedelt sie in Gewässern mit geringer Sukzession und bildet Dominanzbestände. So kann sie auch als Indikatororganismus für nährstoffunbelastetes Wasser, wie etwa für die Badequalität gesehen werden. Die Verbreitung der streifhaarigen Armleuchteralge wird durch Grundwasserzutritt gefördert. Weiterhin bevorzugt sie torf-, sand-, kalk- und tonhaltige Böden (Stroede, 1933). Besonders empfindlich aber reagiert sie auf eine erhöhte Phosphatkonzentration im Wasser (Krause, 1997), (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2005).

**Tabelle 1** Abiotische Standortansprüche von *Chara hispida*

| WIS                 |        | MIN  | MAX  |
|---------------------|--------|------|------|
| O <sub>2</sub>      | [mg/l] | 1    | ∞    |
| Na <sup>+</sup>     | [mg/l] | 15,1 | 30   |
| K <sup>+</sup>      | [mg/l] | 2,5  | 5    |
| Mg <sup>2+</sup>    | [mg/l] | 1    | 25   |
| Ca <sup>2+</sup>    | [mg/l] | 61   | ∞    |
| Fe <sup>2+/3+</sup> | [mg/l] | 0    | 0,75 |
| Mn <sup>2+</sup>    | [mg/l] | 0    | 0,75 |

|                               |        |        |      |
|-------------------------------|--------|--------|------|
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/l] | 0      | 0,08 |
| Cl <sup>-</sup>               | [mg/l] | 10,1   | 30   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/l] | 26     | 80   |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | [mg/l] | 10     | ∞    |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | [mg/l] | 106,75 | ∞    |

***Chara vulgaris*** ist diejenige Armleuchteralgenart, die die größte ökologische Amplitude aufweist. Daraus folgt auch ihr Name „gewöhnliche Armleuchteralge“ (Just & Krause, 2008). Sie kann in allen Erdteilen vorkommen und besiedelt kaum Seen. Man findet sie eher in Abflüssen von Salzquellen und in Brackwasser in Meeresnähe. Als Pionierart ist sie aber auch in Regenwasseransammlungen, in neu angelegten Teichen und in Baugruben zu finden. Sie verfügt über eine reichliche Oosporenproduktion und zeichnet sich speziell durch ihre schnelle Massenentfaltung und den Geruch nach Senföl aus. *Chara vulgaris* kann den gesamten Temperaturbereich besiedeln und in Tiefen bis zu 10m vorkommen (Krause, 1997), (Stroede, 1933).

**Tabelle 2** Abiotische Standortansprüche von *Chara vulgaris*

| WIS                           |        | MIN  | MAX  |
|-------------------------------|--------|------|------|
| O <sub>2</sub>                | [mg/l] | 1    | 10   |
| Na <sup>+</sup>               | [mg/l] | 2,6  | 30   |
| K <sup>+</sup>                | [mg/l] | 0,1  | 5    |
| Mg <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0    | 10   |
| Ca <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 31   | ∞    |
| Fe <sup>2+/3+</sup>           | [mg/l] | 0    | 0,75 |
| Mn <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0    | 0,75 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/l] | 0,09 | 5    |
| Cl <sup>-</sup>               | [mg/l] | 2,6  | 30   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/l] | 26   | 200  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | [mg/l] | 2,1  | 20   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | [mg/l] | 61   | ∞    |

***Chara globularis*** wird auch als die „zerbrechliche Armleuchteralge“ bezeichnet (Just & Krause, 2008). Sie hat eine glatte und schlanke Form, weist lange Seitensprosse auf, und die Internodienlänge überschreitet die Astlänge. Die Achse kann bis zu 120cm hoch werden. Weiterhin fehlen die Stachel, und es sind mehrere Formen von *Chara globularis* möglich; die Unterscheidung erfolgt hinsichtlich der Blätter. Ihr Verbreitungsgebiet sind kalkreiche Umgebungen, sie wachsen aber auch in sauren Gewässern. Dazu haben sie ein kräftiges Ausbreitungsvermögen und zählen zu den nicht-gefährdeten Arten. Ihr Lebensraum zeichnet sich aber auch durch große Wassertiefen und das Vordringen in neu angelegte oder entschlammte Gewässer aus.

*Chara globularis* kann als Indikatororganismus gewertet werden, da dieser gegenüber Nährstoffbelastung weitestgehend tolerant ist. Außerdem ist sie eine ausgesprochen gute Pionierpflanze (Krause, 1997), (Dr. Sängner, Abschlussbericht 2005). Über *Chara globularis* liegt keine Angabe zu den abiotischen Standortansprüchen in Krause vor.

***Chara delicatula*** ist aufgrund ihrer großen Ähnlichkeit eine Subspezies von *Chara fragilis*. Diese Armleuchterart wird auch „feine Armleuchteralge“ genannt (Just & Krause, 2008). Vorwiegend liegt ihr Verbreitungsgebiet in kalkarmen, oligo- bis mesotrophen Gewässern. Aber auch den sauren Bereich besiedelt sie mit Vorliebe. Weiterhin bewohnt sie anorganotrophe und organotrophe Gewässer (Dr. Sängner, Abschlussbericht 2005) (Stroede, 1933).

**Tabelle 3** Abiotische Standortansprüche von *Chara delicatula*

| <b>WIS</b>                    |        | <b>MIN</b> | <b>MAX</b> |
|-------------------------------|--------|------------|------------|
| O <sub>2</sub>                | [mg/l] | 2,6        | ∞          |
| Na <sup>+</sup>               | [mg/l] | 0,1        | 2,5        |
| K <sup>+</sup>                | [mg/l] | 0,1        | 5          |
| Mg <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0          | 5          |
| Ca <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0          | 60         |
| Fe <sup>2+/3+</sup>           | [mg/l] | 0          | 0,1        |
| Mn <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0          | 0,1        |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/l] | 0          | 0,08       |
| Cl <sup>-</sup>               | [mg/l] | 0,1        | 10         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/l] | 5,1        | 80         |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | [mg/l] | 2,1        | 5          |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | [mg/l] | 0          | 61         |

***Chara contraria*** hat eine große Ähnlichkeit mit *Chara foetida*. Umgangssprachlich wird sie „gegensätzliche Armleuchteralge“ genannt (Just & Krause, 2008). Sie ist klein bis mittelgroß und sehr biegsam. Meistens kommt sie in Seen vor, eher selten in Kleingewässern und bevorzugt die mittlere Tiefenzone bis zu 20m. Außerdem kommt sie häufig mit anderen *Characeae*-Arten vergesellschaftet vor. *Chara contraria* kann sanierte Gewässer (Nährstoffeintragsreduzierung) wieder neu besiedeln. Besser als andere Arten kann sie eine begrenzte Eutrophierung ertragen und Standortverluste durch Neuansiedlungen relativ gut ausgleichen (Krause, 1997), (Dr. Sängner, Abschlussbericht 2005), (Stroede, 1933).

**Tabelle 4**      **Abiotische Standortansprüche von *Chara contraria***

| <b>WIS</b>                    |        | <b>MIN</b> | <b>MAX</b> |
|-------------------------------|--------|------------|------------|
| O <sub>2</sub>                | [mg/l] | 2,6        | ∞          |
| Na <sup>+</sup>               | [mg/l] | 2,6        | 15         |
| K <sup>+</sup>                | [mg/l] | 0,6        | 5          |
| Mg <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 5,1        | 25         |
| Ca <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 15,1       | 80         |
| Fe <sup>2+/3+</sup>           | [mg/l] | 0          | 0,75       |
| Mn <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0,1        | 1,5        |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/l] | 0          | 0,5        |
| Cl <sup>-</sup>               | [mg/l] | 2,6        | 30         |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/l] | 5,1        | 80         |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | [mg/l] | 0,05       | 10         |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | [mg/l] | 106,75     | ∞          |



## 2.3 Passiv-biologische Anlage am Standort Pöhla

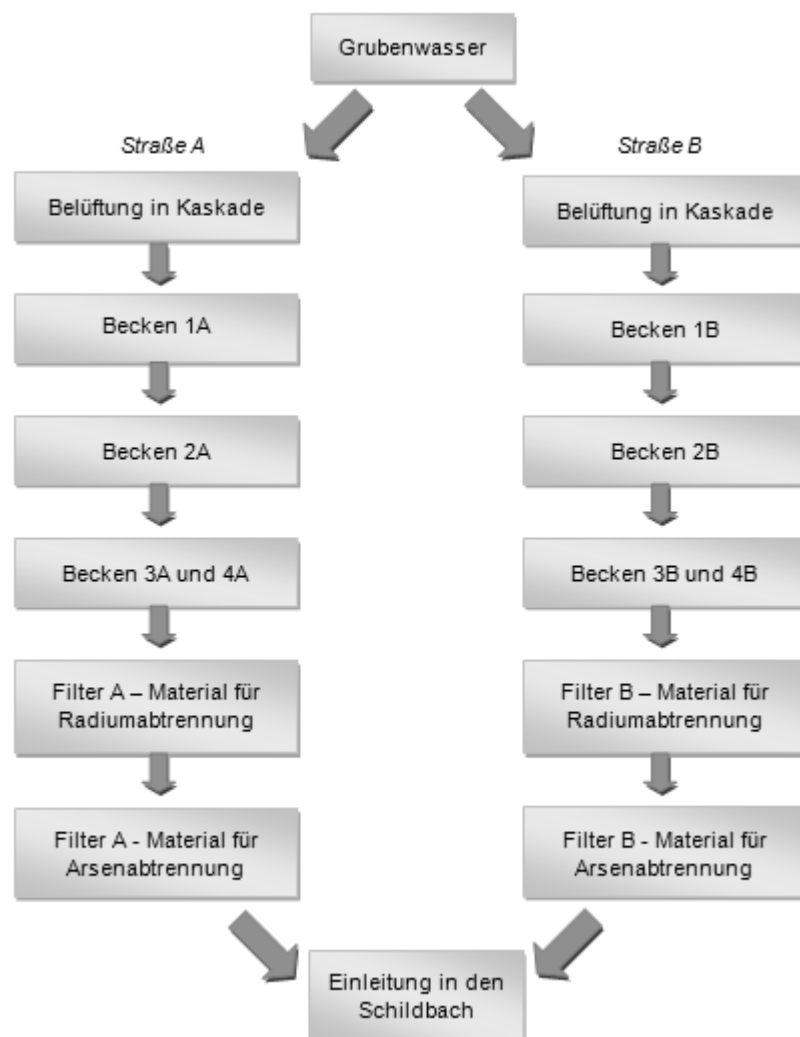
Seit 1995 wird Grubenwasser aus Pöhla-Tellerhäuser aktiv mit einer Wasserbehandlungsanlage gereinigt. Da das Wasser verschiedene Schadstoffe enthält, war die Behandlung unvermeidlich. 1997 konnte die Uranabtrennung eingestellt werden, da dieses Element erfolgreich aus dem Wasser entfernt wurde. Allerdings gehörten auch Eisen, Arsen und  $^{226}\text{Radium}$  zu den umweltfeindlichen Stoffen. Die Abtrennung dieser Substanzen aus dem Wasser erfolgt nur sehr langsam. Die Kosten der Eliminierung würden enorm steigen, wenn weiterhin eine aktive Wasserbehandlungsanlage zum Einsatz käme.

Aus diesem Grund wurde eine passiv-biologische Anlage errichtet (PBA Pöhla) – das „constructed wetland“. Ziel ist die Abtrennung von „Uranerzbergbau typischen Komponenten, wie Arsen und  $^{226}\text{Radium}$  mittels passiver Behandlungsverfahren“ (B.P.S. Engineering Zwickau (1), 2007). Alle Prozesse der PBA Pöhla können so ohne weitere Energiezufuhr und ohne Anwesenheit von Personal ablaufen, wodurch die Kosten enorm gesenkt werden.

Das Wetland hat eine Besiedlungsfläche von etwa 2000m<sup>2</sup> (Verteilung auf acht Becken). Die großtechnische Anlage hat eine natürliche Geländeneigung (550m – 575m NN), sodass das Versuchsgelände problemlos durchflossen werden kann. Weiterhin herrscht in diesem Gebiet (Raum Sachsen) Mittelgebirgsklima. *Abbildung 3* veranschaulicht die Lage der PBA Pöhla [A] in Sachsen (B.P.S. Engineering Zwickau (1), 2007).



**Abbildung 3** Standort Pöhla (Sachsen) [A]



**Abbildung 4 Wasserführung der PBA Pöhla**

Das „constructed wetland“ ist in insgesamt vier Behandlungsstufen aufgeteilt (Abbildung 4) – Wasserzufuhr mit der Grubenwasseraufteilung in zwei Straßen, Kaskade, Absetzbecken und die biologischen Reaktionsräume.

Das zu reinigende Grubenwasser fließt aus einem Stollen in die großtechnische Anlage. Dort teilt sich der Wasserlauf in zwei Straßen A und B. In den nachfolgenden Kaskaden erfolgt eine Oxidationsreaktion, wobei das zweiwertige Eisen mit Sauerstoff zu dreiwertigem Eisen reagiert, welches dann als Eisenhydroxid ausgefällt wird. Durch diese Ausflockung wird Arsen an das dreiwertige Eisen gebunden, wodurch Eisenarsenat entsteht und ebenfalls ausgefällt wird. Die gebundenen Komplexe werden in den Absetzbecken 1A/B akkumuliert. Eingesetzte Schwimmmatten (AQUA-mats®), auf denen verschiedene wasserbehandlungs-spezifische Mikroorganismen kultiviert werden, dienen der Abfiltration der restlichen Ausfällungsprodukte in den Becken 2A/B.

Charakteristisch für eine passiv-biologische Anlage ist die „Biologie“, die für die Abtrennung der schädlichen Stoffe im Wasser verantwortlich ist. So werden in dem „constructed wetland“ als biologische Komponente Armleuchteralgen – die *Characeae* – verwendet. Diese befinden sich in den Becken 3A/B und 4A/B. Aufgabe der Algen ist es, <sup>226</sup>Ra aus dem Grubenwasser abzutrennen. Dazu mussten verschiedene Arten ausgewählt werden, die ein optimales Akkumulationspotential für die Schadstoffe und eine gute Wachstumsdynamik in Abhängigkeit von den gegebenen speziellen abiotischen und biotischen Bedingungen aufweisen. Insgesamt konnten so sechs verschiedene Arten in die PBA Pöhla aus unterschiedlichsten autochthonen Standorten eingesetzt werden (*Tabelle 5*) (B.P.S. Engineering Zwickau (2), 2008).

**Tabelle 5** Autochthone Standorte der *Characeae*-Arten

| <i>Characeae</i> -Art    | autochthoner Standort  |
|--------------------------|--|
| <i>Chara vulgaris</i>    | Luftbad Mockritz ( <i>Dresden</i> );<br>Himmelschlüsselwiese ( <i>Chemnitz</i> );<br>Reichsbahnbad ( <i>Chemnitz-Hilbersdorf</i> ) |
| <i>Chara contraria</i>   | südliche Rhön ( <i>Raum Dermbach, Thüringen</i> );<br>Kulkwitzer See ( <i>Leipzig</i> );   |
| <i>Chara polyacantha</i> | Phillip See ( <i>Huttenheim</i> );<br>Burggraben ( <i>Schloss Großkochberg</i> )   |
| <i>Chara hispida</i>     | Phillip See ( <i>Huttenheim</i> );<br>Burggraben ( <i>Schloss Großkochberg</i> )   |
| <i>Chara globularis</i>  | Wildenfels;<br>Himmelschlüsselwiese ( <i>Chemnitz</i> );   |
| <i>Chara delicatula</i>  | Himmelschlüsselwiese ( <i>Chemnitz</i> );<br>Indianerteich ( <i>Chemnitz</i> )   |

Der Aufbau der Algenpopulation erfolgte über Oosporen oder über Biomasse aus den jeweiligen autochthonen Standorten. Teilweise wurde auch das dazugehörige Sediment in das Wetland eingesetzt. Die Biomasse kann die veränderten Standortbedingungen nicht so schnell aufnehmen, wodurch es zu Bestandsausfällen kommen kann. Die Oosporen passen sich besser an die neuen abiotischen Bedingungen an. Dieser Vorgang dauert aber etwa eine Vegetationsperiode länger (Dr. Sängler, Abschlussbericht 2007).

Auch wenn eine <sup>226</sup>Ra-Abtrennung in der PBA Pöhla dokumentiert werden kann, so ist doch das größte Problem der Eisengehalt im Wasser. Er kann nicht vollständig durch die Kaskade und die Absetzbecken (1A/B und 2A/B) abgeschieden werden. So lagert sich das Eisen als Eisenhydroxidbeläge auf der Biomasse der Armleuchteralgen ab.

Dadurch wird eine organische Schicht gebildet. Als Folge dessen werden der Biomassezuwachs und die Fotosyntheseleistung beeinträchtigt. Die Biomasse ist nach Abwaschen der Beläge allerdings noch vital. Eine Untersuchung der Schwimmmatten hat ergeben, dass von den wasserbehandlungsspezifischen Mikroorganismen ebenfalls  $^{226}\text{Ra}$  abgetrennt wird. Diese sind ebenfalls mit den Belägen überzogen. Die AQUA-mats® dürften normalerweise keinerlei Radium binden; dafür sind die *Characeae* zuständig. Diese Untersuchung lässt vermuten, dass nicht nur die *Characeae* Radium aus dem Wasser abtrennen, sondern auch die organischen Schichten auf jeglicher Biomasse im Wetland. Daraus ergibt sich die Annahme, dass die Beläge selbst biologisch aktiv sein könnten (Dr. Sängler, Abschlussbericht 2008).

Da Arsen und  $^{226}\text{Ra}$  nicht vollständig durch die *Characeae* abgetrennt werden können, müssen im Anschluss an die Becken 3A/B und 4A/B zwei Filter angeordnet werden. Diese enthalten zwei reaktive Medien – Hedulat und Ferrosorp. Hedulat (Schwerspat mit Geopolymer) trennt das restliche  $^{226}\text{Ra}$  aus dem Grubenwasser ab. Ferrosorp (granuliertes Eisenhydroxid) bindet das Arsen, sodass Eisenarsenat entsteht. Die Filterrückstände können anschließend entfernt werden (B.P.S. Engineering Zwickau (4), 2008).

Die beiden Straßen werden zum Schluss wieder zusammengeführt. Das gereinigte Grubenwasser wird in den Schildbach eingeleitet.

Neben der PBA Pöhla wurde eine Anzuchtanlage (AZA) errichtet, die eventuelle Verluste, beispielsweise durch Schädigungen infolge der Wintermonate, ausgleichen sollen. Bis zu diesem Zeitpunkt kam dafür die Pilotanlage zum Einsatz. Bei dieser Bestandsoptimierung werden verschiedene *Characeae*-Arten über Oosporen oder Biomassebestände in der neuen AZA ausgesetzt, um sich dort optimal entwickeln zu können und genügend Biomasse zu erzeugen. Die Anzucht über Oosporen dauert zwar eine Vegetationsperiode länger; die Anpassung erfolgt aber schneller an die veränderten abiotischen Bedingungen, wenn die *Characeae* bzw. deren Oosporen aus den autochthonen Standorten entnommen werden. Bei der Ansiedlung über die Biomasse lassen sich Bestandsausfälle nicht vermeiden. Generell gleichen sich aber die beiden Ansiedlungsmethoden hinsichtlich deren Schnelligkeit bei der Bestandsoptimierung in der PBA aus. Die Wasserbedingungen in der AZA ähneln denen in der Pilotanlage (Verwendung von Seigenwasser). Es sind optimale und bestmögliche Entwicklungsgrundlagen für die *Characeae* vorhanden (Dr. Sängler, Abschlussbericht 2007), (Dr. Sängler, Abschlussbericht 2006b).

### 2.3.1 Untersuchung des Belages in der passiv-biologischen Anlage

Schubert & Marquardt des Fachbereichs Ökologie der Universität Rostock wurden 2007 beauftragt, den vorhandenen Belag auf den *Characeae* in den Becken 3A/B und 4A/B der PBA hinsichtlich ihrer biologischen Aktivität zu untersuchen. Ziel war die Bestimmung der Fotosyntheseaktivität und Strahlungsakklimatisierung (physiologische Anpassung von Organismen an veränderte abiotische Umweltfaktoren). Ersteres wurde mit einer Sauerstoffelektrode (Clarkelektrode) durchgeführt. Die Unterwasser-Lichteinstrahlungsmessung erfolgte mit einem Spektralradiometer in der Einheit  $\frac{\mu\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$ . Hierbei wurde auch der Extinktionskoeffizient  $K_0$  in  $\frac{1}{\text{m}^2}$  ermittelt (Schubert & Marquardt, 2009).

Für die Auswertung der Daten werden Vorkenntnisse in der Ermittlung der Fotosynthese benötigt. Allgemein motivieren drei Faktoren die Beziehung zwischen Fotosynthese und Licht:

- erstens besteht die Möglichkeit einer Simulation und Vorhersage über die Veränderung der Biomasse;
- zweitens kann eine In-situ Produktivität bestimmt werden;
- drittens ermöglicht eine mathematische Formulierung die Bestimmung der physiologischen Parameter der Fotosynthese.

Die Einflussfaktoren (Temperatur, Licht, Anpassung, etc.) werden in fünf verschiedenen Parametern beschrieben:

- $P (p^B)$  ermittelte Brutto oder Netto-Fotosyntheseleistung
- $P_{\max} (p_m^B)$  maximale fotosynthetische Sauerstoffproduktionsrate bei Sättigungsstrahlung
- $I$  Strahlungsintensität
- $\alpha$  Neigung der Fotosynthesekurve bei limitierter Strahlung
- $R$  Respirationskoeffizient (negative Fotosynthese – Atmung)

Ausgehend von diesen Gleichungselementen, fassten Jassby & Platt alle in der Literatur vorhandenen mathematischen Formulierungen der Licht-Sättigungskurve zusammen (Abbildung 5).

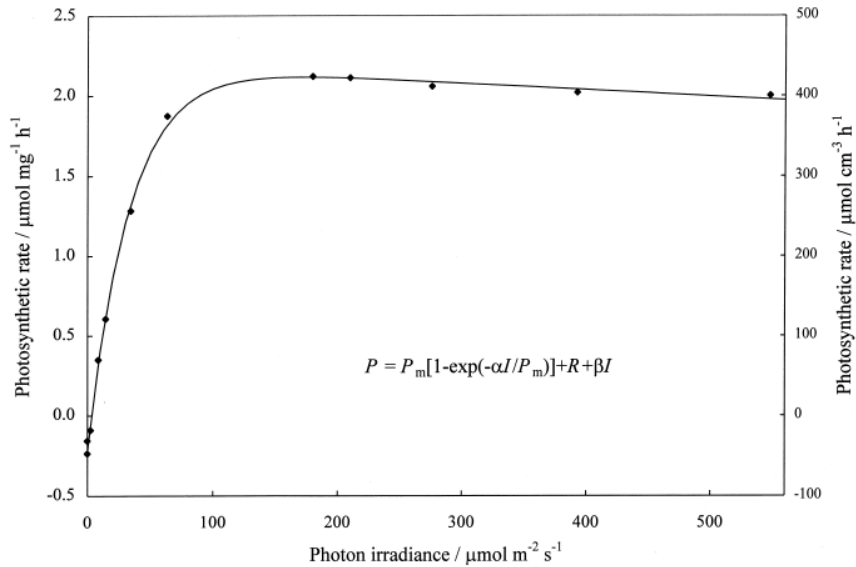
| Equation number | Equation   | Source*                          |
|-----------------|--|----------------------------------|
| 1               | $P^B = \begin{cases} \alpha I, & I \leq P_m^B / \alpha \\ P_m^B, & I > P_m^B / \alpha \end{cases}$                               | Blackman (1905)                  |
| 2               | $P^B = P_m^B \alpha I / (P_m^B + \alpha I)$  | Baly (1935)                      |
| 3               | $P^B = P_m^B \alpha I / [P_m^B + (\alpha I)^2]^{\frac{1}{2}}$  | Smith (1936)                     |
| 4               | $P^B = \alpha I \exp(-\alpha I / P_m^B e)$   | Steele (1962)                    |
| 5               | $P^B = \begin{cases} \alpha I \exp(-\alpha I / P_m^B e), & I \leq P_m^B e / \alpha \\ P_m^B, & I > P_m^B e / \alpha \end{cases}$ | Steele (1962)<br>modified†       |
| 6               | $P^B = P_m^B [1 - \exp(-\alpha I / P_m^B)]$  | Webb et al. (1974)               |
| 7               | $P^B = \begin{cases} \alpha I - (\alpha I)^2 / 4 P_m^B, & I \leq 2 P_m^B / \alpha \\ P_m^B, & I > 2 P_m^B / \alpha \end{cases}$  | Platt et al. (1975)<br>modified† |
| 8               | $P^B = P_m^B \tanh(\alpha I / P_m^B)$  | original?                        |

**Abbildung 5** Verschiedene mathematische Formulierungsmöglichkeiten der Licht-Sättigungskurve in der Literatur

Die Betrachtung in *Abbildung 5* beschränkt sich rein auf die Brutto-Fotosyntheserate. Um die Netto-Fotosyntheserate ausrechnen zu können, muss lediglich von der Brutto-Fotosyntheserate der Respirationskoeffizient subtrahiert werden, sodass gilt (Jassby & Platt, Juli 1976):

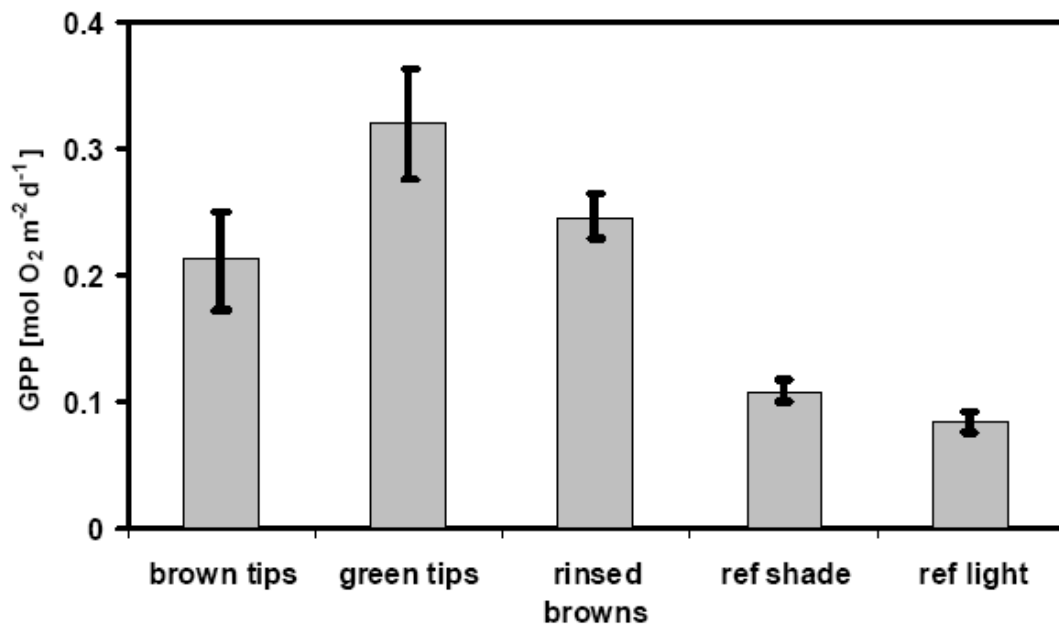
$$P_{\text{netto}} = P_{\text{brutto}} - R$$

Die Menge an fotosynthetisch produzierten Produkten hängt stark von der Biomassekonzentration auf einer bestimmten Oberfläche ab, von der Fotosyntheserate je Biomasse und von den Strahlungsintensitäten (Lichtabschwächung abwärts der Wassersäule). *Walsby* führte Untersuchungen bezüglich der Parameter  $P_{\text{max}}$  und  $\alpha$  durch. Diese erreichen immer ihr Maximum am Nachmittag eines jeden Tages, sodass eine Korrelation zwischen den beiden nachgewiesen werden kann. Auch eine Beziehung zwischen der Wachstumsrate und der Bestrahlungsintensität kann dokumentiert werden. Der größte Fehler bei der Einschätzung der Fotosyntheserate wird durch eine ungenügende Betrachtung der Temperatur hervorgerufen. Dies kann einen Fehler von bis zu 50% erzeugen. Aber auch die Bewertung des Respirationskoeffizienten verursacht Fehlentscheidungen (Walsby, 2001). In *Abbildung 6* wird die Beziehung zwischen der Strahlungsintensität und der Fotosyntheserate betrachtet (Vaughan, Davis, & Walsby, 2001).



**Abbildung 6** Beziehung zwischen der Sauerstoffproduktionsrate und der Bestrahlungsstärke

Ausgehend von den fotosynthetischen Grundlagen, führten Schubert & Marquardt die Belagsuntersuchung an *Chara vulgaris* im Becken 4A der PBA durch. Die Untersuchung der Brutto-Primärproduktion wird in *Abbildung 7* dargestellt. Hierbei wurden zuvor die einzelnen Parameter  $P_{\max}$ ,  $I$ ,  $\alpha$ , und der Lichtkompensationspunkt sowie der Lichtsättigungspunkt der Fotosynthese von *Chara vulgaris* ermittelt. Die schwarzen Linien verdeutlichen den Schwankungsbereich unter wolkenlosen und bewölkten Wetterbedingungen (Schubert & Marquardt, 2009).

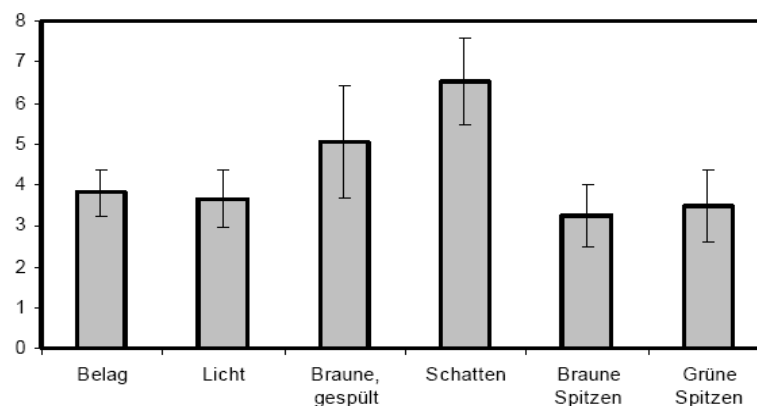


**Abbildung 7** Brutto-Primärproduktion in Abhängigkeit von den ermittelten Fotosynthese-Parametern und der Tagesbestrahlungsstärke

Erläuterung der Beschriftung in *Abbildung 7*:

- *brown tips* - verkrustete Algen (Becken 4A)
- *green tips* - unverkrustete Algen (Becken 4A)
- *rinsed browns* - gereinigte Algen (Belagentfernung) (Becken 4A)
- *ref shade* - Algen vom Schattenstandort der Pilotanlage
- *ref light* - Algen vom Lichtstandort der Pilotanlage

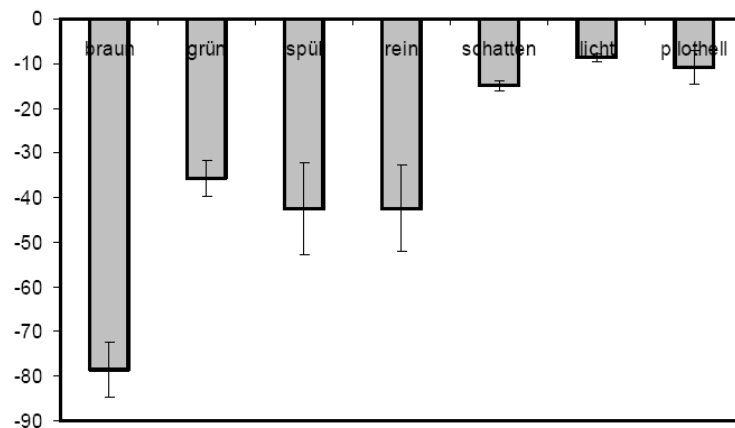
Auffällig bei der Ermittlung der fotosynthetischen Parameter war, dass  $P_{\max}$  nach Entfernung der Kruste geringer war als zuvor. Außerdem fiel der Respirationskoeffizient ebenso ab. Dies könnte ein erstes Indiz für eine fotosynthetische Aktivität des Belages darstellen. Die Ergebnisse in *Abbildung 7* zeigen deutlich den Unterschied zwischen den verkrusteten und den unverkrusteten Algen. Letztere weisen eine eindeutig höhere Fotosyntheseleistung auf. Auch zwischen Lichtstandort und Schattenstandort sind Besonderheiten darstellbar. Nach Schneider et al. besitzen die *Characeae* einen Mechanismus der wachstumsbasierten Orientierung zum Licht. Dadurch werden sie vor zu viel Lichteinstrahlung geschützt. Wenn die Zweige steil aufwärts wachsen, konvergent zur Sprossachse (Winkel Zweig-Achse ist klein), sind die Armleuchteralgen hohen Lichtintensitäten (Lichtstandort) ausgesetzt. Sofern diese gerade und wenig geneigt wachsen (Winkel Zweig-Achse ist groß), ist die Lichteinstrahlung eher gering (Schattenstandort). Bei der ersten Variante nimmt automatisch die Chlorophyll a- und Carotinoid-Konzentration als Schutzmechanismus für die Sexualorgane (Antheridium und Oogon) vor Lichtschäden ab. Die Aufwärtsorientierung der Zweige führt zu einer erhöhten Lichtdurchlässigkeit im gesamten Chara-Bett, sodass die Fotosyntheseleistung erhöht werden kann (Schneider, Ziegler, & Melzer, 2006). In *Abbildung 8* ist diese Besonderheit zur Abschätzung des Lichtschutzbedarfs bei Proben aus dem Lichtstandort und dem Schattenstandort deutlich zu erkennen (Schubert & Marquardt, 2007).



**Abbildung 8** Chl a/ Carotinoid-Verhältnis verschiedener Proben



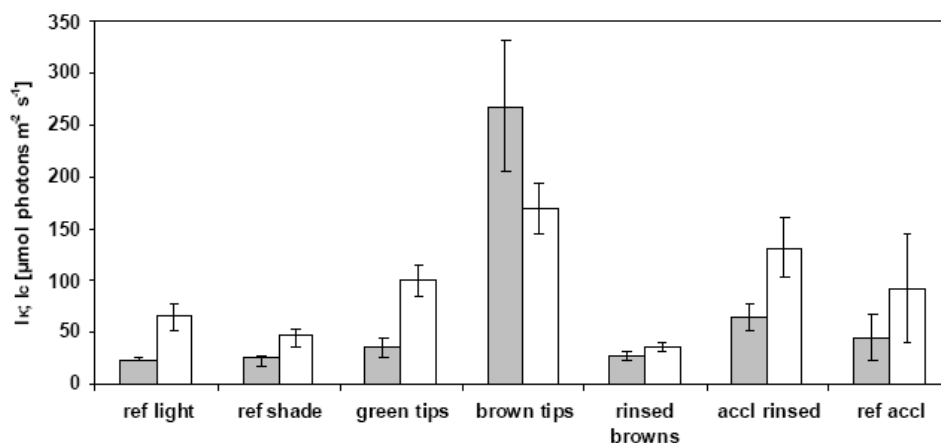
*Schubert & Marquardt* führten auch Untersuchungen zum Akklimationsprozess durch. Hierbei veränderte sich die Fotosyntheseleistung nicht gleich nach dem Abwaschen des Belages, sondern erst einige Wochen später. Das bedeutet, dass *Chara vulgaris* einige Zeit zur Regeneration benötigt. Auch der Respirationskoeffizient offenbart zu erwartende Ergebnisse (*Abbildung 9*).



**Abbildung 9** Respirationskoeffizient

Gerade die belegten Chara-Proben (*braun*) zeigen einen hohen Respirationswert auf, was vermuten lässt, dass diese weniger fotosynthetische Produkte produzieren als beispielsweise Proben aus der Pilotanlage (*Schatten, Licht*) (*Schubert & Marquardt, 2007*).

Auch der Lichtkompensationspunkt ( $I_c$  - graue Balken) und der Lichtsättigungspunkt  $I_k$  (weiße Balken) wurden von *Schubert & Marquardt* untersucht (*Abbildung 10*). „Je höher  $I_c$ , desto geringer [ist] die Zeit, die täglich für ein Nettowachstum zur Verfügung steht. Je höher  $I_k$ , desto später am Tag wird eine Auslastung des Fotosyntheseapparates erreicht“ (*Schubert & Marquardt, 2007, S. 18*)



**Abbildung 10** Lichtkompensationspunkt und Lichtsättigungspunkt

Auf der Grundlage der Analysen konnte eine biologische Aktivität des Belages auf *Chara vulgaris* nachgewiesen werden. Einerseits war es möglich, heterotrophe bakterielle Organismen nachzuweisen (mittels einer photometrischen Belagsuntersuchung). Aber auch fotosynthetisch aktive Organismen sind vorhanden, wobei aber noch nicht deren Herkunft geklärt werden konnte (Archäebakterien können ausgeschlossen werden). Der Belag beeinträchtigt die *Chara vulgaris* in Bezug auf den Gasaustausch und die Nährstoffaufnahme, sodass die Primärproduktion um rund 40% gedämpft wird. Trotz der Einschränkung sind die Armleuchteralgen in der Lage, sich an die Bedingungen anzupassen und ein vergleichsweise schnelles Wachstum durchzuführen (Schubert & Marquardt, 2007), (Schubert & Marquardt, 2009).

### 2.3.2 <sup>226</sup>Radium

Wie schon in *Abschnitt 2.3* beschrieben, ist hauptsächlich die „Biologie“ in der PBA von entscheidender Bedeutung. Die <sup>226</sup>Ra-Konzentration überschreitet dort den Grenzwert aufgrund der Verwendung von Grubenwasser aus einem Stollen. Dieses ist stark vorbelastet mit Kontaminanten. Um das umweltschädliche <sup>226</sup>Ra aus dem Wasser entfernen zu können, wurden fünf verschiedene Arten von *Characeae* in die PBA eingesetzt. Der Mechanismus ist allerdings noch ungeklärt. Es existieren zwei verschiedene Theorien. Allgemein haben die *Characeae* eine besonders hohe Affinität gegenüber dem <sup>226</sup>Ra, da die Zellwände in der Lage sind, verschiedene Elemente (Ca, Mg und Carbonate) zu akkumulieren. Die erste Möglichkeit besteht darin, das <sup>226</sup>Ra in die Carbonate einzubauen. Das geschieht aufgrund eines relativ hohen lokalen pH-Wertes, den sich die Algen selbst im Bereich der Pflanze schaffen können. So werden aus den Zellen Hydroxidionen herausgepumpt, und das <sup>226</sup>Ra wird in die Carbonate eingebaut. Die zweite Möglichkeit beschäftigt sich mit Bariumsulfat – einem Bestandteil der Rhizoide. Diese Verbindung absorbiert das <sup>226</sup>Ra bzw. baut dieses in die Kristallstruktur ein. So dienen die *Characeae* in der PBA als Aufbereitungspflanze für <sup>226</sup>Ra, weshalb Carbonatformationen und Bariumsulfatfällungen im Wasser nicht fehlen dürfen (Kalin, Smith, & Wittrup, 2002).

Insgesamt beeinflussen sieben Faktoren das <sup>226</sup>Ra-Vorkommen im Wasser.

- Physikalisch-chemische Form des <sup>226</sup>Ra im Wasser und die Veränderungsdynamik
- Zusammensetzung des Wassers
- Adsorption von gelösten <sup>226</sup>Ra, von suspendierten Feststoffen und Bodensedimenten
- Mitfällung des <sup>226</sup>Ra durch Feststoffe, die im Wasser vorhanden sind
- Sedimentation von <sup>226</sup>Ra und Resuspendierung vom Bodensedimenten
- Auslösung und Desorption von <sup>226</sup>Ra aus Feststoffen und Bodensedimenten
- Biologische Aufnahme und Transport

Im Wasser hat das <sup>226</sup>Ra die Form eines Ions ( $\text{Ra}^{2+}$ ). Dieses kann an organische Materialien gebunden werden. So ist die Aktivität etwa vier Zehnerpotenzen in der Biomasse höher als im Wasser. *Kalin* beschäftigte sich mit dem Mechanismus der Radium-Aufnahme durch Organismen. Sie kommt zu dem Schluss, dass <sup>226</sup>Ra genauso in die Zelle aufgenommen und metabolisiert wird wie Calcium. Grund dafür sind die chemisch ähnlichen Eigenschaften zu den alkalischen Elementen im Periodensystem. Die Algen können so in zwei Gruppen eingeteilt werden:

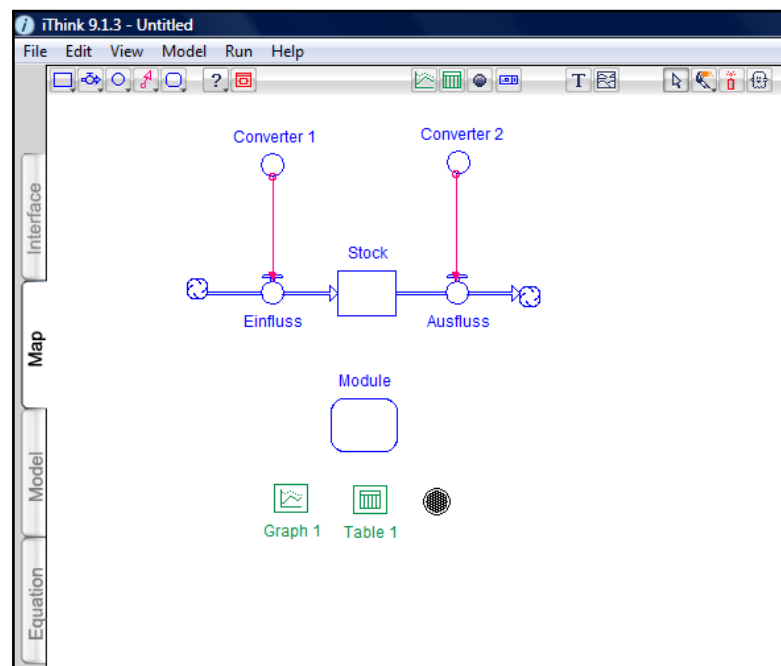
1. Gruppe: Algen antworten mit der Zeit mit einer konstanten Erhöhung der  $^{226}\text{Ra}$ -Konzentration. So wird ein Gleichgewicht innerhalb von drei Tagen eingestellt.
2. Gruppe: Algen zeigen am ersten Tag eine maximale Aufnahme von  $^{226}\text{Ra}$ . Anschließend lässt diese nach, sodass sich innerhalb der nächsten fünf Tage ein Gleichgewicht einstellt.

Natürliche Wasservorkommen weisen meist einen Radium-Gehalt von 0,001Bq/l bis 0,35Bq/l auf. In der PBA werden Konzentrationen von bis zu 3 Bq/l nachgewiesen (Kalin, 2003).

## 2.4 Simulationsprogramm *iThink*<sup>®</sup>

Die Simulationsumgebung *iThink*<sup>®</sup>/*Stella*<sup>®</sup> ist eine Entwicklung von *isee systems*<sup>®</sup>. 1987 wurde dieses Unternehmen aufgrund der ersten Einführung einer Icon-basierenden Modellierungs- und Simulationswerkzeugs - *Stella*<sup>®</sup> - mit dem Jay-Forrester-Preis ausgezeichnet. 1990 wurde das Programm *iThink*<sup>®</sup> für Simulationen im Unternehmensbereich entwickelt (*isee systems*<sup>®</sup>, 2010).

*iThink*<sup>®</sup> findet seine Anwendung in Wirtschaft, Wissenschaft und Technik. Benutzt wird das Programm zur Risikoverringerung in bestimmten Verfahrensdurchführungen und bei Prozessveränderungen. Weiterhin können die wichtigsten Ansatzpunkte für die Verbesserung der Unternehmensleistung identifiziert und geeignet umgesetzt werden. Auch die Erstellung von „Was-Wäre-Wenn“-Szenarien ist eine Möglichkeit für die Entscheidungsunterstützung. Eine Besonderheit des Simulationsprogrammes ist, dass funktionsübergreifende Teams mit diesem Programm optimal ein gemeinsames Verständnis für bestimmte Probleme aufbauen können. So ist es besser möglich, eine Lösung mit mehreren Projektpartnern zu erarbeiten (*isee systems*<sup>®</sup>, 2010).




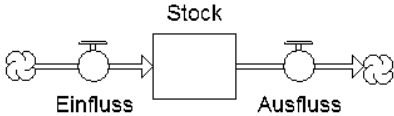
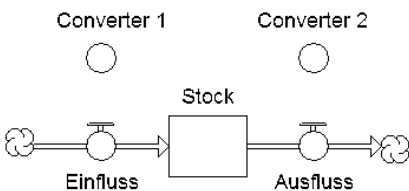
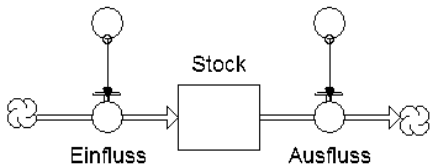
**Abbildung 11** Darstellung der Menü- und Tool-Leiste sowie der verschiedenen Registerkarten in *iThink*<sup>®</sup>

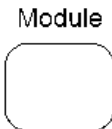


*iThink*<sup>®</sup> besteht aus einer grafischen objektorientierten Benutzeroberfläche, die die Modellierung auch für Laien vereinfacht; denn es werden nur sehr wenige Kenntnisse in der Programmierung vorausgesetzt. Durch die benutzerfreundliche Oberfläche kommt der Anwender nicht mit Modellgleichungen in Kontakt (siehe *Abbildung 11*). Diese werden in einer „Equation Layer“ abgebildet. Integrierte Funktionen erleichtern

das Einfügen von mathematischen, statistischen und logischen Operatoren, wie etwa das logische „UND“ oder auch die logarithmische Funktion „LOG“. Wenn ein Modell nicht nur auf eindimensionaler Ebene simuliert werden soll, können auch Arrays zum Einsatz kommen. Die mehrdimensionale Erweiterung wird in Form von Vektoren im Modell eingesetzt und repräsentiert wiederholte Modellstrukturen (isee systems®, 2010).

Um die Modellierung in *iThink*® so übersichtlich wie möglich darzustellen, bietet das Programm verschiedene „Tools“ an (Abbildung 11), die als Bauelemente in die grafische Benutzeroberfläche eingefügt werden können. Tabelle 6 stellt diese Bausteine dar (isee systems®, 2010).

**Tabelle 6** Erläuterung der Bauelemente in *iThink*®

| Bauelement  | Erklärung  |
|---|--|
| <p>Stock</p>                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>In einem <b>Stock</b> ist eine Eingabe von Eigenschaften möglich;</li> <li>Stellt ein Reservoir für bestimmte Größen dar (Menge Biomasse, Wassermenge in einem Becken).</li> </ul>  |
|                                      | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Einfluss</b> und <b>Ausfluss</b> definieren die gebildete Menge im Stock.</li> <li>Die Wolken geben an, dass Einfluss und Ausfluss aus dem „Nichts“ in das „Nichts“ fließen.</li> <li>Einflüsse können eine Gleichung oder einen konstanten Wert haben.</li> </ul> |
| <p>Converter 1      Converter 2</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li><b>Converter</b> können definiert werden als Variablen, grafische Funktionen oder Konstanten und können von den Flüssen genutzt werden.</li> <li>Ebenso können hier dynamische Importe oder Exporte aus bzw. in <i>Excel</i>® vorgenommen werden.</li> </ul>          |
| <p>Converter 1      Converter 2</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>Die <b>Steckverbindungen</b> ermöglichen es, dass die Converter von den Flüssen genutzt werden können.</li> <li>Converter oder Stocks können auch als „<b>Ghost</b>“ erscheinen, das eine Bearbeitung mit identischen Elementen erleichtert.</li> </ul>               |

|   |  |
|---|--|
|    | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ <b>Module</b> unterstützen eine hierarchische Struktur der Modelle.</li> <li>○ Hier sind Teilmodelle enthalten, wodurch die Übersichtlichkeit eines Modells erhalten bleibt.</li> </ul> |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>○ Die Ausgabe kann beispielsweise in Form von Tabellen, Grafiken, Warnblinkern oder Berichten geschehen</li> </ul>  |

Innerhalb der Converter können drei verschiedene Zeichen stehen:

- \*                    der Stern verdeutlicht einen Import aus *Excel*<sup>®</sup>
- ~                    die Tilde stellt eine grafische Funktion in einem Converter dar
- \* und ~            Stern und Tilde bedeuten, dass eine grafische Funktion aus *Excel*<sup>®</sup> importiert wurde

Mit Hilfe dieser Bauelemente kann nahezu jede Aufgabenstellung gelöst und simuliert werden. Die Ergebnisdarstellung erfolgt dabei in Form von Graphen, Tabellen, Animationen, Warnblinkern oder Berichten. Die Eingabegeräte stellen Knöpfe, Regler, Schalter und Buttons dar. Die skizzierbaren Graphen ermöglichen einen einfachen Vergleich von den zu erwartenden Ergebnissen mit der wirklichen Simulation. Wer sein Simulationsmodell vor Fremdzugriffen schützen möchte, kann ein Modellsicherheitsfeature benutzen, das die Sperrung oder einen Passwortschutz ermöglicht (isee systems®, 2010).

*isee Runtime*<sup>®</sup> stellt die Modelle mit einem professionellen „full-screen“-Aussehen dar, sodass es besser ausgetauscht und kommerziell vertrieben werden kann. Die End-Nutzer können so ein fertiges Modell bedienen, ohne von den Symbolleisten oder Toolbars abgelenkt zu werden. Stattdessen interagieren sie über eine „full-screen“-grafische Benutzeroberfläche. Der Modellautor kann dabei selbst entscheiden, welche Elemente vom End-Nutzer verändert und letztlich auch gespeichert werden können (isee systems®, 2010).

Der *isee Player*<sup>®</sup> ermöglicht die Erforschung von allen Ebenen – Interface, Map, Model und Equation Layer – und ist unbegrenzt nutzbar. So wird durch diesen Player die Möglichkeit angeboten, mit außenstehenden Personen zu kommunizieren, ohne dass die komplette *iThink*<sup>®</sup>-Software benötigt wird (isee systems®, 2010).

### **3 Erstellung eines Konzeptes für die Modellierung der Wachstumsdynamik und Schadstoffaufnahme von *Characeae***

#### **3.1 Formulierung der benötigten Elemente mit einer Darstellung der Modellkonzepte**

Die Modellierung der Wachstumsdynamik und der Schadstoffaufnahme basiert ausschließlich auf vorhandenen Daten in der Literatur oder den zahlreichen Beprobungen innerhalb des Wetlands Pöhla. Um noch mehr Daten zu erhalten, ist es unumgänglich, zahlreiche Experimente mit den *Characeae* durchzuführen. Hierfür wäre der Zeitraum einer gesamten Vegetationsperiode erforderlich, der meist von Ende April bis Anfang Oktober dauert und damit teilweise außerhalb der Bachelorarbeitsphase liegt. Anschließend müssten die Experimentdaten mit Angaben aus der Literatur verglichen werden, was einen noch größeren Zeitaufwand zur Folge hätte. Generell wäre dies aber ein guter Ansatzpunkt, um noch mehr Daten über die *Characeae* zu erhalten und diese in das Modell sinnvoll einzubauen.

Im nachfolgenden *Abschnitt 3.1* sollen dem Leser die erstellten Modellkonzepte näher erläutert werden. Hierbei kommen Screenshots zum Einsatz. Um die verwendeten Bezeichnungen in *iThink*® besser aufzuzeigen, werden diese im Text „Fett“ und „Kursiv“ dargestellt.

Die Erstellung des Modellkonzeptes wird in zwei große Teilgebiete unterteilt. Einerseits wird ein Extremstandort betrachtet - das constructed wetland am Standort Pöhla (Modellkonzept PBA). Andererseits wird das Wachstum und die Schadstoffaufnahme in Bezug auf optimale Bedingungen (Modellkonzept AZA) simuliert. Diese Unterteilung ist notwendig, da die Bedingungen in den beiden Gebieten zu unterschiedlich sind und verschiedene Elemente benötigt werden, die das Wachstum beeinflussen. Außerdem soll dem Außenstehenden die ungleiche Entwicklung der Armleuchteralgen unter den gegebenen Bedingungen anschaulich übermittelt werden.

Aus der Literaturrecherche konnten viele Daten über ganz unterschiedliche *Characeae*-Arten gesammelt werden. Hierbei lag die Konzentration vorwiegend auf den Arten, die auch in der PBA Pöhla vorhanden sind. Diese stellen *Chara vulgaris*, *Chara hispida*, *Chara polyacantha*, *Chara globularis*, *Chara contraria* und *Chara delicatula* dar.

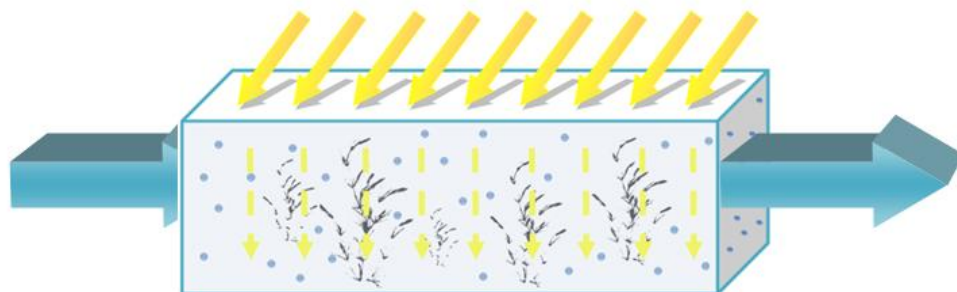


Da von *Prof. Schubert* und *Ronny Marquardt* der Universität Rostock *Chara vulgaris* für verschiedene Untersuchungen ausgewählt wurde, konzentriert sich das Modellkonzept rein auf diese Art der Armleuchteralgen. Auch für andere Arten kann das Modell zum Einsatz kommen, sofern die Untersuchungen auch für diese durchgeführt werden. Aber nicht nur basierend auf den Analysen von *Schubert & Marquardt* wurde *Chara vulgaris* ausgewählt, sondern auch aufgrund der hohen Verfügbarkeit von Informationen in der Literatur (Schubert & Marquardt, 2007).

Doch eine Frage muss bei der Vorbereitung der Erstellung eines Modellkonzeptes von mehreren Seiten beleuchtet werden: Wie wird der Schadstoff eigentlich in die *Characeae* eingebaut? Für die Beantwortung gibt es Hypothesen, die im Voraus aufgezeigt werden müssen.

1. Die Biomasse der *Characeae* wirkt als Proxy. Das heißt, die Oberfläche bzw. ihre Struktur bewirkt eine Ausfällung der Schadstoffe. So wäre die Biomasse als Proxy zu verwenden. Zur Verdeutlichung: Ein Kugelschreiber würde genauso viele Schadstoffe aufnehmen wie der Organismus selbst.
2. Die Schadstoffe werden in die neu gebildete Biomasse eingelagert. So würde sich das Nettowachstum als Parameter für die Schadstoffeinlagerung anbieten, der die Remediationsleistung bestimmt.
3. Die Schadstoffaufnahme erfolgt im Zuge der Fotosyntheseleistung (Aufnahme/Einlagerung/Ablagerung). Die tatsächliche Fotosyntheseleistung liefert so den besten Bezug zur Remediationsleistung.

In den Modellkonzepten (PBA und AZA) wird sich auf die dritte Hypothese gestützt, da diese Variante der Schadstoffaufnahme am realistischsten ist und die beste Möglichkeit einer Durchführung in *iThink*® bietet.



**Abbildung 12 Veranschaulichte Darstellung der Problematik**

Abbildung 12 veranschaulicht in einer einfachen Darstellung die eigentliche Problemstellung des Modells. Das Wasserbecken kennzeichnet die Becken 3A/B und 4A/B der PBA mit Zulauf (aus Becken 2) und Ablauf. In groben Zügen sind hier die

wichtigsten Elemente aufgeführt, wie etwa die Globalstrahlung der Sonne oder ihre Abschwächung durch das Wasser. Dies wird über einen Attenuationskoeffizienten (Extinktionskoeffizient) ermittelt. Die Problematik der Wasserinhaltsstoffe, des Zuwachses und der stehenden Biomasse stellen einen wichtigen Punkt in der Modellerstellung dar. Auch die Schadstoffabtrennung durch die Algen spielt eine wichtige Rolle. Eine solche Illustration (*Abbildung 12*) wird im Folgenden immer zum Einsatz kommen, um die Biologie, die sich in solch einem System abspielt, dem Außenstehenden verständlich und anschaulich zu erläutern.

Da durch ein Modell die Natur mit zahlreichen Einschränkungen und Zielsetzungen abgebildet wird, können nicht alle Einflussgrößen eines biologischen Systems berücksichtigt werden. So erfolgt nur eine gewisse Annäherung der Ergebnisse (vgl. *Abschnitt 2.1*). Demzufolge lässt es sich nicht vermeiden, bestimmte Größen zu vernachlässigen bzw. diese zu verallgemeinern oder vereinfacht in das Modell einzufügen.

Um die Einheiten der beiden Modellkonzepte verständlich darzustellen, wird in *Anlage 1* eine Übersicht über die einzelnen Elemente gegeben.

### 3.1.1 Annahmen

In den nachfolgenden Modellkonzepten wird nicht ein komplettes Pflanzensystem betrachtet, sondern es wird sich auf eine einzige *Chara vulgaris*-Pflanze bezogen. So kann ein gewisser Konkurrenzkampf mit anderen Organismen und die gegenseitige Beschattung ausgeschlossen werden (vgl. *Abschnitt 4*).

$dt$  gibt das Zeitintervall der Kalkulation an. Diese Funktion kann in einer beliebigen Zeiteinheit angegeben werden (Stunde, Tag, Woche, Monat, Jahr, etc.). Im Modell wird  $dt$  als Tag definiert und erhält die Größe eins ( $dt = 1$ ). Das bedeutet, dass die Simulation in „Ein-Tages-Schritten“ durchgeführt wird. Der Betrachtungsbereich der Simulation liegt bei 2190 Tagen (sechs Jahre). So werden Assimilations- und Dissimilationsprozesse berücksichtigt, allerdings erfolgt eine Mittelwertbildung. Es resultiert ein Nettowert pro Tag. Für  $dt$  wäre auch ein Wert kleiner als eins möglich. So könnten auch einzelne Tagesgänge näher betrachtet werden, mit den dazugehörigen Schwankungen hinsichtlich der Assimilation und Dissimilation. Da keine Untersuchungen diesbezüglich vorliegen, werden diese biologischen Prozesse durch  $dt = 1$  vereinfacht und die zeitliche Aufspaltung nicht betrachtet. Prinzipiell besteht aber die Möglichkeit der Erweiterung des Modellkonzeptes um diese Komponenten.

Sowohl unter extremen als auch unter optimalen Bedingungen ist die Höhe des Wasserstandes im Becken auf einen Meter bemessen. Es wird zudem auch ausgeschlossen, dass die Pflanze einem Trockenstress ausgesetzt wird (kein Wasser).

Bezüglich der Eingangsstrahlung wird eine Diffusionsstrahlung ausgeschlossen. Im Modell wird so die Globalstrahlung als diejenige Strahlung betrachtet, die tatsächlich die Erdoberfläche ohne Absorption, wie etwa durch Staubteilchen, oder Reflexion an der Wasseroberfläche erreicht. Die Daten hierfür stammen vom Deutschen Wetterdienst (DWD).

Weitere Annahmen werden in der Erläuterung des Modellkonzeptes aufgeführt, um die Übersichtlichkeit zu wahren und Vereinfachungen an geeigneter Stelle besser darzustellen.

### 3.1.2 Optimaler Standort (Modellkonzept AZA)

Das Modellkonzept AZA ist in *Anlage 2* (Modellkonzept AZA.itm) enthalten.

An den autochthonen Standorten liegen optimale Bedingungen für die Armleuchteralgen-Art *Chara vulgaris* vor. Hier wachsen die Pflanzen, ohne anthropogenes Einwirken, aus eigener Kraft. Für die Analysen bestimmter Gewässerparameter natürlich vorkommender *Chara vulgaris*, wurde LfULG des Landes Sachsen beauftragt, Analysedaten bestimmter Seen in Sachsen freizugeben. Sie werden ausschließlich für diese Arbeit in Bezug auf dieses Thema verwendet. Dabei handelt es sich um ausgewählte Gewässerstandorte, unter anderem den Kulkwitzer See (Nordbucht), den Markleeberger See (Ostbecken) oder den Werbeliner See (Nord) (*Tabelle 7*). *Chara vulgaris* kommt aber auch noch an anderen Standorten in Sachsen vor, wie etwa im Speicher Borna, im Seelhausener See oder dem Steinbruchrestgewässer nahe Wurzen (LfULG, 2009). In *Anlage 3* ist die Datenbank mit den Seen verfügbar. Aus den Daten von LfULG wurden nur einige relevante Parameter ausgewählt, um die Chemie der Gewässer besser darstellen zu können.

**Tabelle 7** Beprobung der autochthonen Standorte

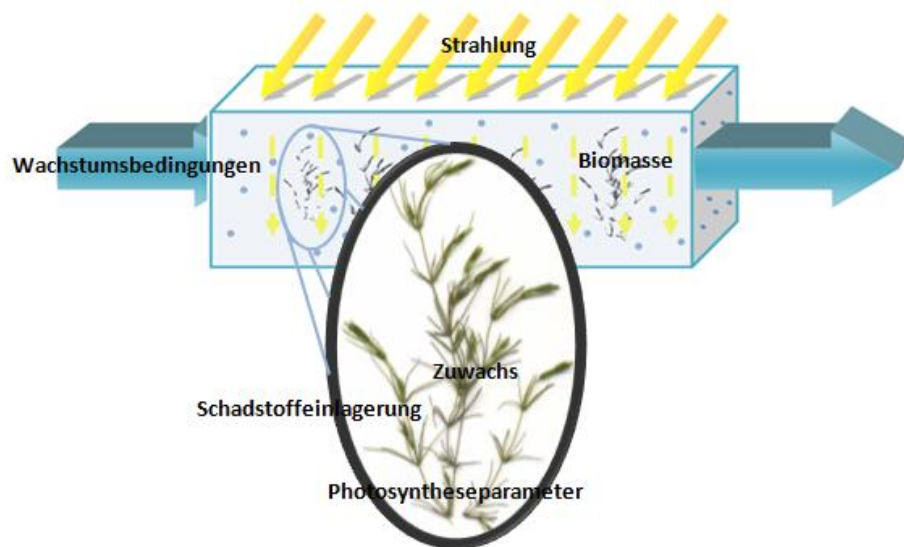
| <i>Parameter</i>                   | <i>Einheit</i> | <i>Kulkwitzer See<br/>Nordbucht</i> | <i>Markleeberger<br/>See Ostbecken</i> | <i>Werbeliner See<br/>Nord</i> |
|------------------------------------|----------------|-------------------------------------|--|--------------------------------|
| <i>pH</i>                          |                | 7,9                                 | 7,7                                    | 7,9                            |
| <i>O<sub>2</sub></i>               | <b>mg/l</b>    | 8,6                                 | 6,8                                    | 9,9                            |
| <i>Na<sup>+</sup></i>              | <b>mg/l</b>    | 80                                  | 28                                     | 57                             |
| <i>K<sup>+</sup></i>               | <b>mg/l</b>    | 11                                  | 5,4                                    | 9,8                            |
| <i>Mg<sup>2+</sup></i>             | <b>mg/l</b>    | 42                                  | 51                                     | 37                             |
| <i>Ca<sup>2+</sup></i>             | <b>mg/l</b>    | 330                                 | 330                                    | 180                            |
| <i>Fe<sup>2+/3+</sup></i>          | <b>mg/l</b>    | < 0,03                              | < 0,03                                 | < 0,03                         |
| <i>Mn<sup>2+</sup></i>             | <b>µg/l</b>    | < 1                                 | 1,9                                    | 18                             |
| <i>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></i>  | <b>mg/l</b>    | 0,04                                | 0,03                                   | 0,04                           |
| <i>Cl<sup>-</sup></i>              | <b>mg/l</b>    | 150                                 | 39                                     | < 0,5                          |
| <i>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></i> | <b>mg/l</b>    | 890                                 | 940                                    | 500                            |
| <i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></i>  | <b>mg/l</b>    | 4,4                                 | 3                                      | 1,7                            |
| <i>P<sub>ges</sub></i>             | <b>mg/l</b>    | < 0,01                              | <0,01                                  | <0,01                          |
| <i>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></i> | <b>mg/l</b>    | 73                                  | 120                                    | 110                            |
| <i>Ba<sup>2+</sup></i>             | <b>µg/l</b>    | 26                                  | 35                                     | 29                             |

Die einzeln beprobten Parameter eines jeden autochthonen Standortes können nun in Beziehung zum Toleranzbereich von *Chara vulgaris* (vgl. *Tabelle 2*) betrachtet werden. Wie zu vermuten, stimmen auch hier diese nicht vollkommen miteinander überein. Es sind deutliche Differenzen zu erkennen, wie etwa beim Magnesium-, Kalium-, Chlorid- und Sulfatgehalt. Auch bei Natrium, Mangan und Nitrat korrelieren die Parameter nicht

unbedingt mit dem Toleranzbereich. Die Vermutung von *Dr. Pietsch* bestätigt sich, dass *Chara vulgaris* diejenige Armleuchteralge ist, die eine der größten ökologischen Amplitude im Bereich des Artenspektrums *Characeae* aufweist (Pietsch, 1987). Auch wenn Parameter von dem Toleranzbereich abweichen, kann diese Art dennoch ihr optimales Wachstum erreichen.

Zu der PBA Pöhla wurde eine Anzuchtstation (AZA) errichtet. Diese soll eventuelle Verluste in der PBA ausgleichen und ist rein für die Anzucht der benötigten *Characeae*-Arten zuständig. Die neue AZA ersetzt die bis dahin vorhandene Pilotanlage. Diese wurde für das erste Pilotprojekt der PBA errichtet. Da an diesem Standort das Wasser nahezu optimale Bedingungen aufweist (Seigenwasser), werden diese auch im Modellkonzept als optimale Wassereigenschaften definiert. Im Folgenden wird das Modellkonzept in Bezug auf die AZA als optimaler Standort festgelegt.

Die Erstellung des Modellkonzeptes konzentriert sich auf sechs große Teilbereiche (*Abbildung 13*).



**Abbildung 13** Darstellung der sechs Teilbereiche des Modellkonzeptes unter optimalen Bedingungen

Die Wachstumsbedingungen, die Solarstrahlung mit den Fotosyntheseparametern und die Definition des Zuwachses wirken sich hierbei direkt auf das Biomassewachstum aus. Die Schadstoffeinlagerung steht in engem Kontakt mit der Biomasse, da sich die Schadstoffaufnahme proportional zur Biomasseentwicklung verhält.

In den nachfolgenden Absätzen werden alle Bereiche im Modellkonzept näher erläutert. Sofern in Punkt 3.1.3 (Erläuterung des Extremstandortes) keine Änderungen zu Punkt 3.1.2 (Erläuterung des optimalen Standortes) erkennbar sind, gelten automatisch die nachstehenden Erklärungen für den Extremstandort, da diese

Bereiche in beiden Modellkonzepten äquivalent zueinander sind. So wird eine doppelte Auseinandersetzung mit gleichen Problemen vermieden.

## i) Wachstumsbedingungen

Den wichtigsten Punkt bilden die Wachstumsbedingungen. Die einzelnen Elemente wurden im Jahr 2008 am Standort AZA beprobt und in das Modellkonzept AZA eingefügt (*Anlage 4*). Hier werden die Wasserparameter (WIS) näher betrachtet. Stimmen die Werte der WIS nicht mit dem zu vertragenden Toleranzbereich der jeweiligen Art überein, bzw. weichen diese zu sehr davon ab, ist es überhaupt nicht möglich, die Biomasseentwicklung zu beobachten, da sich eine Pflanzengesellschaft überhaupt nicht entwickeln würde.

Jedes Wasser, an autochthonen oder extremen Standorten, enthält bestimmte Inhaltsstoffe, die nur in einem ganz bestimmten Toleranzbereich von *Chara vulgaris* vertragen werden. In *Tabelle 8* ist die Spannbreite der einzelnen Parameter dargestellt (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) (vgl. *Abschnitt 2.2.3*).

**Tabelle 8** Toleranzbereich von *Chara vulgaris*

| Element                       |        | MIN  | MAX  |
|-------------------------------|--------|------|------|
| Na <sup>+</sup>               | [mg/l] | 2,6  | 30   |
| K <sup>+</sup>                | [mg/l] | 0,1  | 5    |
| Mg <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0    | 10   |
| Ca <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 31   | ∞    |
| Fe <sup>2+/3+</sup>           | [mg/l] | 0    | 0,75 |
| Mn <sup>2+</sup>              | [mg/l] | 0    | 0,75 |
| NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | [mg/l] | 0,09 | 5    |
| Cl <sup>-</sup>               | [mg/l] | 2,6  | 30   |
| SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | [mg/l] | 26   | 200  |
| NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | [mg/l] | 2,1  | 20   |
| HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | [mg/l] | 61   | ∞    |
| O <sub>2</sub>                | [mg/l] | 1    | 10   |
| PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | [mg/l] | 0    | 0,15 |
| <sup>226</sup> Ra             | Bq/l   | ?    | ?    |

Die zu vertragenden MIN- und MAX-Konzentrationen werden in das Modell als Vektor der Dimension WIS\_AZA von einer Exceltabelle importiert. Dieser Vektor stellt in *iThink*® ein Array dar. Mit Hilfe der Wassereigenschaften (Wasserinhaltsstoffe – WIS) und der zu vertragenden maximalen und minimalen Bereiche lässt sich für *Chara vulgaris* ein Vergleich anstellen, ob die Werte der Wasserparameter im Toleranzbereich liegen oder nicht. *Tabelle 9* stellt die Verbindung zwischen den einzelnen Elementen in dem Vektor dar. Im Vergleich IST-SOLL wird ein Prozentsatz ermittelt.

**Tabelle 9** Darstellung des Vektors der Dimension *WISWasser\_PBA*

| <i>IST<br/>WISWasser</i> | <i>SOLL</i> |     | <i>Vergleich<br/>IST-<br/>SOLL</i> |
|--------------------------|-------------|-----|------------------------------------|
|                          | MIN         | MAX |                                    |
| $Na^+$                   |             |     |                                    |
| $K^+$                    |             |     |                                    |
| $Mg^{2+}$                |             |     |                                    |
| $Ca^{2+}$                |             |     |                                    |
| $Fe^{2+/3+}$             |             |     |                                    |
| $Mn^{2+}$                |             |     |                                    |
| $NH_4^+$                 |             |     |                                    |
| $Cl$                     |             |     |                                    |
| $SO_4^{2-}$              |             |     |                                    |
| $NO_3^-$                 |             |     |                                    |
| $HCO_3^-$                |             |     |                                    |
| $O_2$                    |             |     |                                    |
| $PO_4^{3-}$              |             |     |                                    |
| $^{226}Ra$               |             |     |                                    |

Der Vergleich IST-SOLL wird mit den folgenden zwei Formeln beschrieben:

**Gleichung 1**

$$\begin{aligned}
 &IST\ WISWasser < MIN: & PS &= \frac{MIN - IST\ WISWasser}{MIN} \\
 &IST\ WISWasser > MAX: & PS &= \frac{IST\ WISWasser - MAX}{MAX} \\
 &MIN < IST\ WISWasser < MAX: & PS &= 0
 \end{aligned}$$

So kann der Prozentsatz *PS* ermittelt werden, der die Abweichung der Werte der *WIS* der einzelnen Elemente im Vergleich zu den dazugehörigen Soll-Werten angibt.

Nun stellt sich folgende Frage: Ist eine Unterschreitung des Toleranzbereiches genau so zu bewerten, wie die Überschreitung desselben Bereiches? Allgemein nimmt mit zunehmendem Nährstoffangebot die Biomasse zu. Doch von einem gewissen Punkt an wirkt auch ein Überangebot toxisch auf die Bestände. Hervorgerufen wird das durch einen induzierten Mangel, oder aber die Aufnahme eines anderen Nährstoffs wird behindert. Ein Nährstoffmangel hingegen kann bei den *Characeae* durch die chemische Ähnlichkeit von bestimmten Elementen, wie etwa Natrium und Kalium, ausgeglichen werden. Hier wird die Algenpflanze „ausgetrickst“, sodass das Wachstum trotz Mangel fortgeführt werden kann. Eine Unterversorgung kann aufgrund der unzureichenden Verfügbarkeit einen akuten Mangel verursachen.

Hinsichtlich der verschiedenen Elemente unterscheidet man die Nährstoffe in Grundelemente, Mengenelemente und Spurenelemente (*Tabelle 10*).

**Tabelle 10** Darstellung der einzelnen Elemente, unterteilt in drei Gruppen

| <b>Grundelemente</b> | <b>Mengenelemente</b> | <b>Spurenelemente</b> |
|----------------------|-----------------------|-----------------------|
| H                    | Na                    | Fe                    |
| C                    | K                     | Mn                    |
| O                    | Ca                    | Br                    |
| N                    | Mg                    | Cu                    |
|                      | S                     | Zn                    |
|                      | Cl                    | I                     |
|                      | P                     | Cr                    |

Es kann die Aussage getroffen werden, dass die Grundelemente für die Pflanzen am wichtigsten sind. Aber auch die Mengenelemente sind unentbehrlich für das Pflanzenwachstum. Spurenelemente hingegen werden nur in sehr geringen Mengen für das Wachstum benötigt, wobei aber auch ein Überangebot zu Schäden an der Pflanze führen kann. *Tabelle 11* beschreibt die Symptome bei Unterschreitung bzw. Überschreitung der einzelnen Elemente.

**Tabelle 11** Übersicht über die Symptome eines Mangels und eines Überschusses von ausgewählten Elementen

|    |   |
|----|---|
| Na | chemischer Aufbau zu K ähnlich  |
|    | Na kann physiologische Aufgaben von K bei der Regulation des Wasserhaushalts übernehmen → Mangelsymptome treten erst später auf |
| P  | Überschuss: Absterben der Blätter   |
|    | Mangel: Hemmung Stoffwechselwege  |
| N  | Überschuss: Pflanzenschäden   |
|    | Mangel: wenige Verzweigungen; Pflanzen werden gelb und kleiner  |
| Mg | Mangel: Stoffwechsel kommt zum Erliegen   |
| S  | Mangel: gehemmtes Sprossachsenwachstum, kein Absterben  |
| Ca | Mangel: geringes Wachstum; „verkrüppelt“  |

Auf der Grundlage dieser Erkenntnis (*Tabelle 11*) können bestimmte Abstufungsbewertungen der WIS in Abhängigkeit jedes einzelnen Stoffes durchgeführt werden. In *iThink*<sup>®</sup> erfolgt die Abschätzung in Bezug auf den Vektor *WIS\_AZA*. Wie in *Abbildung 14* dargestellt, stellt eine Null die Einhaltung des Toleranzbereiches dar. Die Abstufungen von eins bis sechs verdeutlichen eine Wachstumsabschwächung von zehn bis sechzig Prozent. Eine Einhundert veranschaulicht eine totale Wachstumshemmung.



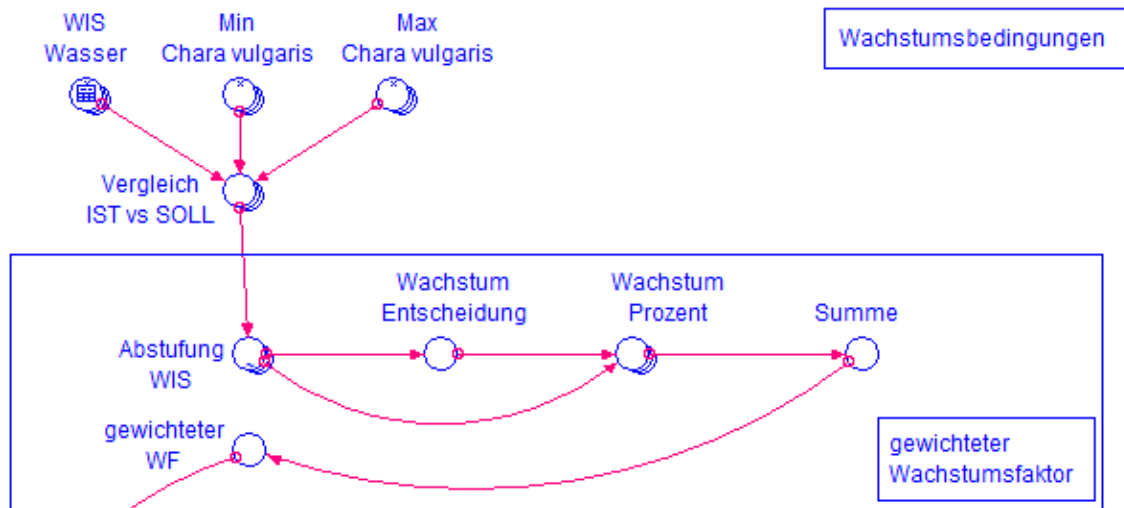
[illegible]

**Abbildung 14** Abstufungsbewertung des Vektors *WISWasser PBA*

$$\prod_1^{14}(\textit{Wachstumszahlen})$$

In Weg B wird ein gewichteter Wachstumsfaktor ermittelt (Bildung einer Summe und eines Durchschnittswertes). Jeder einzelne Wachstumsparameter hat dabei eine Gewichtung von  $\frac{1}{\text{Anzahl der Parameter}}$ , sodass jedem gleich viel Bedeutung zugewiesen wird und die Elemente ihre Abhängigkeit zueinander verlieren.

Wenn in der Natur ein Parameter nur geringfügig für die Pflanze verfügbar ist und die anderen Stoffe die Pflanze optimal versorgen, wird wahrscheinlich nicht das komplette Wachstum zum Erliegen kommen. So erscheint Weg B als die bestmögliche Lösung für die Abstufungsbewertung zu sein. *Abbildung 15* gibt die Umsetzung des Vektors *WIS\_AZA* und den gewichteten Wachstumsfaktor im Modellkonzept wieder.



**Abbildung 15** Darstellung der Abstufungsbewertung in iThink®

In dem Converter „**Vergleich IST vs SOLL**“ werden zunächst die Prozente der Abweichung ausgegeben. Dabei können die Werte sowohl negativer als auch positiver Natur sein. Erstere deuten auf eine Unterschreitung des Toleranzbereiches hin und letztere auf eine Überschreitung. Für das Element  $^{226}\text{Ra}$  kann keine Abstufungsbewertung durchgeführt werden, weil hier der Toleranzbereich von *Chara vulgaris* unbekannt ist. Deshalb wird angenommen, dass diese Art der Armleuchteralgen von null bis unendlich viel  $^{226}\text{Ra}$  verträgt. Anschließend werden in dem Converter **Abstufung WIS** die Abstufungsbewertungen, wie in *Abbildung 14*, durchgeführt. Danach wird geprüft, ob eine Einhundert von einem Parameter in dem Vektor ausgegeben wird. Dies ist der Fall, wenn ein Wert eines Elementes des Eingangswassers so stark von dem Toleranzbereich von *Chara vulgaris* abweicht, dass das Wachstum wahrscheinlich um einhundert Prozent gehemmt wird. Folglich wird in dem Converter „**Wachstum Entscheidung**“ null ausgegeben (es wird keine Biomasse gebildet). Sind nur die Zahlen von eins bis sechs in **Abstufung WIS** vertreten, werden anschließend die Prozente der einzelnen Elemente ausgegeben (**Wachstum Prozent**), summiert, und gemittelt, sodass danach im **gewichteten WF** beispielsweise ein Wachstum von 94,45% notiert werden kann. In der nachfolgenden *Abbildung* wird eine Beispielrechnung der Abstufungsbewertung durchgeführt (*Abbildung 16*).

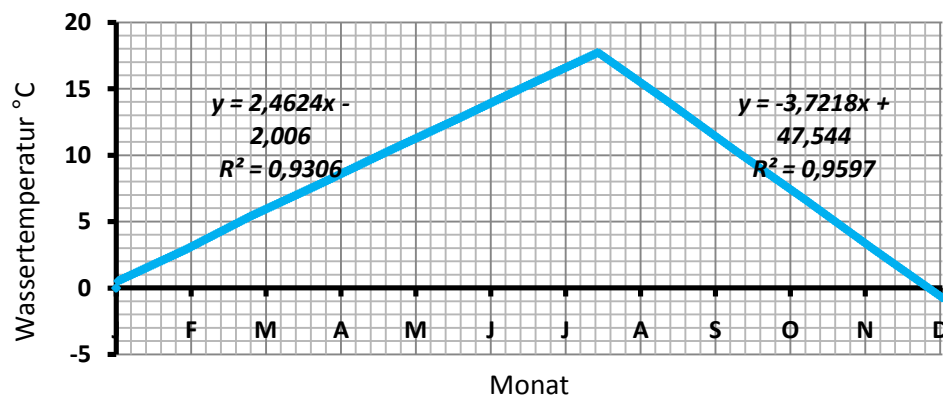
Beispiel:

| Elemente des Vektors<br><i>WISWasser_PBA</i> | Na     | K  | Mg | Ca  | Fe | Mn  | NH <sub>4</sub> | Cl  | SO <sub>4</sub> | NO <sub>3</sub> | HCO <sub>3</sub> | O <sub>2</sub> | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | <sup>226</sup> Ra |
|--|--------|----|----|-----|----|-----|-----------------|-----|-----------------|-----------------|------------------|----------------|-------------------------------|-------------------|
| <b>Abstufung WIS</b>                         | 2      | 4  | 4  | 0   | 2  | 0   | 0               | 0   | 5               | 3               | 0                | 0              | 0                             | 0                 |
| <b>Wachstum Prozent</b>                      | 80     | 60 | 60 | 100 | 80 | 100 | 100             | 100 | 50              | 70              | 100              | 100            | 100                           | 100               |
| <b>Summenbildung</b>                         | 1200   |    |    |     |    |     |                 |     |                 |                 |                  |                |                               |                   |
| <b>Mittelwert</b>                            | 85,71% |    |    |     |    |     |                 |     |                 |                 |                  |                |                               |                   |

**Abbildung 16** Beispiel einer Abstufungsbewertung bis hin zur Einschätzung des Wachstumsfaktors

## ii) Wassertemperatur

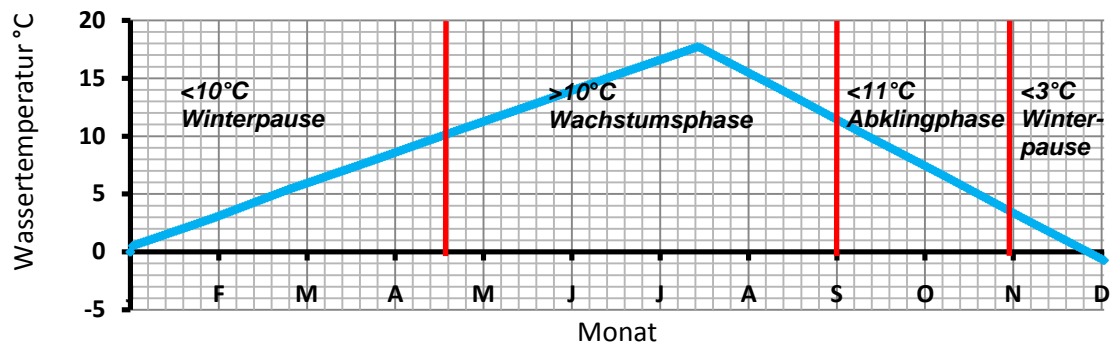
Nicht nur chemische Eigenschaften des Eingangswassers spielen eine große Rolle bei der Definition der Wachstumsbedingungen, sondern auch die Temperatur. Die Daten einer kompletten Temperaturbeprobung sind vorhanden und wurden an den Messpunkten m-225 und m-233 des Beckens 3/4A gemessen. Ausgehend von den Messwerten, wurde der Mittelwert gebildet, sodass für jeden Monat ein Wert vorhanden war. Es konnte eine Lineargleichung ermittelt werden. Der lokale Extrempunkt (Schnittpunkt beider Geraden) gilt gleichzeitig als der Punkt der maximalen Temperatur an einem bestimmten Tag. Anschließend wurden Funktionswerte für jeden Tag eines Jahres ermittelt (365 Tage). Die so entstehende grafische Funktion wurde als Import in *iThink*® eingefügt (*Diagramm 1*).



**Diagramm 1** Temperaturlinearisierung

Ausgehend von den einzelnen Funktionswerten, kann eine Einteilung hinsichtlich der Arleuchtalgen durchgeführt werden. In der AZA und der PBA Pöhla wurde beobachtet, dass sich die *Characeae* von Ende April bis Ende September in der Wachstumsphase befinden. Dem schließt sich bis Ende November eine Abklingphase bzw. Sterbephase an. Von Dezember bis April befinden sich die *Characeae* in der

Winterpause und zeigen nur geringe Stoffwechselaktivitäten. Ausgehend von diesen Beobachtungen, kann die Temperatur eingebettet werden.



**Diagramm 2** Temperaturlinearisierung mit Phaseneinteilung

Wie in *Diagramm 2* beschrieben, kann, ausgehend von der Wassertemperatur, eine Phaseneinteilung durchgeführt werden. Die Daten liegen im Modellkonzept vor und können jederzeit in das Modell eingebunden werden. Derzeit ist noch ein weiterer Vektor im Modell vorhanden – **HilfEinteilungJahr**, der momentan aufgrund einer zeitlichen Wachstumsverschiebung durch die Annahme, dass das Wachstum mit einer Oospore beginnt, den **WasserTemperauren**-Converter ablöst.

### iii) Zuwachs

Neben dem Bereich Wachstumsbedingungen spielt im Modellkonzept auch der Zuwachs eine wichtige Rolle (*Abbildung 17*). Dieser wird unter optimalen Bedingungen definiert. Da das Wachstum einer *Characeae*-Pflanze mit einer Oospore (**OS**) beginnt, wurde im Modellkonzept auf eine bestimmte Ausgangsmasse zurückgegriffen. Die Begründung hierfür erfolgt durch *Krause*. Er gibt für verschiedene Arten die Oosporengroße an, wie etwa für *Chara vulgaris* (535µm Höhe und 300µm Breite). Außerdem ist in der Literatur ein ovales Aussehen festzustellen (*Krause*, 1997, S. 83). So wird der Größenbereich einer Oospore im Modellkonzept auf ein Volumen (mit 1000µm Tiefe) von  $0,1605\text{mm}^3$  festgelegt. Bei einer Dichte von  $1 \frac{\text{mg}}{\text{mm}^3}$  ( $d = \frac{m}{V}$ ) ergibt sich eine Ausgangsmasse der Oospore von  $0,1605\text{mg}$ .

Aus der Literatur ist bekannt, dass *Chara vulgaris* eine „artenarme ephemere Gesellschaft“ (*Pietsch*, 1987, S. 79) bildet. Das bedeutet, dass die Armleuchteralgenart einjährig ist. Doch aufgrund der Beobachtungen in der AZA und der PBA Pöhla konnte diese Aussage nicht bestätigt werden, da auch nach der Winterpause noch Biomasse in den Becken festgestellt werden konnte. Eine Erklärung kann die fortlaufende Vergesellschaftung verschiedener Arten innerhalb der Anlage sein. Andernfalls gibt es möglicherweise mehrere Unterarten von *Chara vulgaris*, die sowohl einjährig als auch

mehrfährig auftreten. Da in der Literatur dieser Sachverhalt noch ungeklärt ist, geht das Biomassewachstum im Modellkonzept im ersten Jahr von der Masse einer Oospore aus. In den darauffolgenden Jahren erfolgt die Entwicklung, ausgehend von der stehenden verbliebenen aktiven Biomasse des Vorjahres.

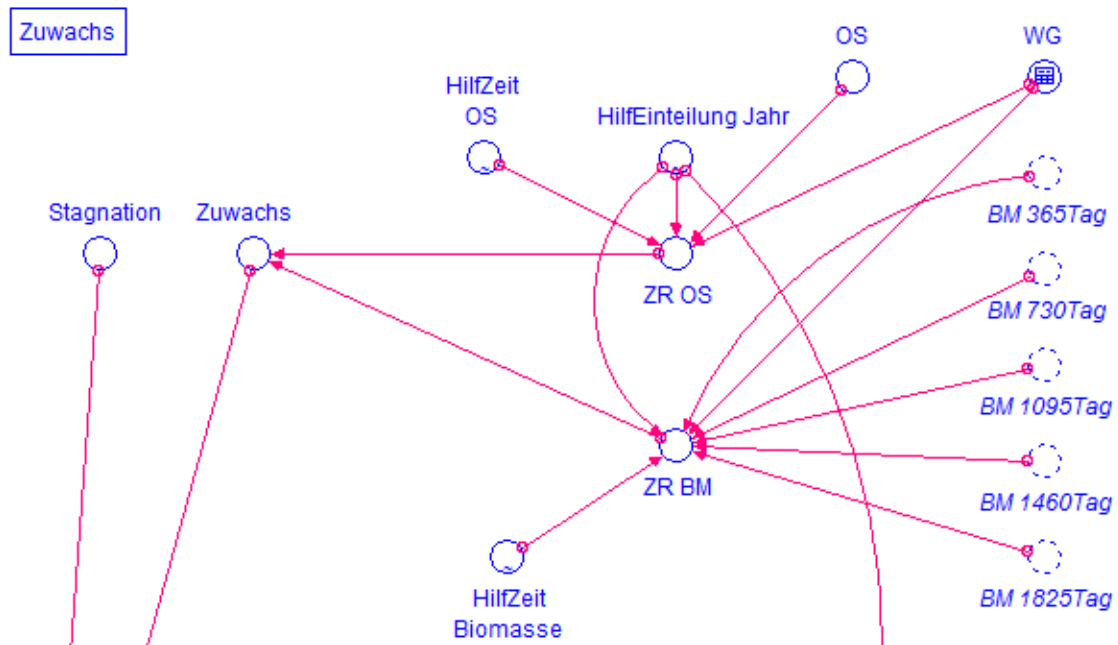


Abbildung 17 Darstellung des Zuwachses in iThink®

Der Zuwachs (siehe Abbildung 17) setzt sich aus der Zuwachsrates Oospore (**ZR OS**) und der Zuwachsrates Biomasse (**ZR BM**) zusammen. In beiden Parametern spielt **HilfEinteilungJahr** eine Rolle. Aus der Literatur ist bekannt, dass Pflanzen eine bestimmte Anlaufphase benötigen, bevor sie in die Wachstumsphase übergehen, sofern diese aus einem Samen bzw. Oospore erfolgt. Aus diesem Grund ist die exponentielle Phase in **HilfEinteilungJahr** im ersten Jahr länger (153 Tage) als in den darauffolgenden Jahren (je 123 Tage).

Um den jährlichen exponentiellen Zuwachs einer Pflanze berechnen zu können, wurde im Modellkonzept folgende Funktion verwendet:

**Gleichung 2** 
$$M(\textit{Chara vulgaris})_t = M_0 * (1 + WF)^t$$

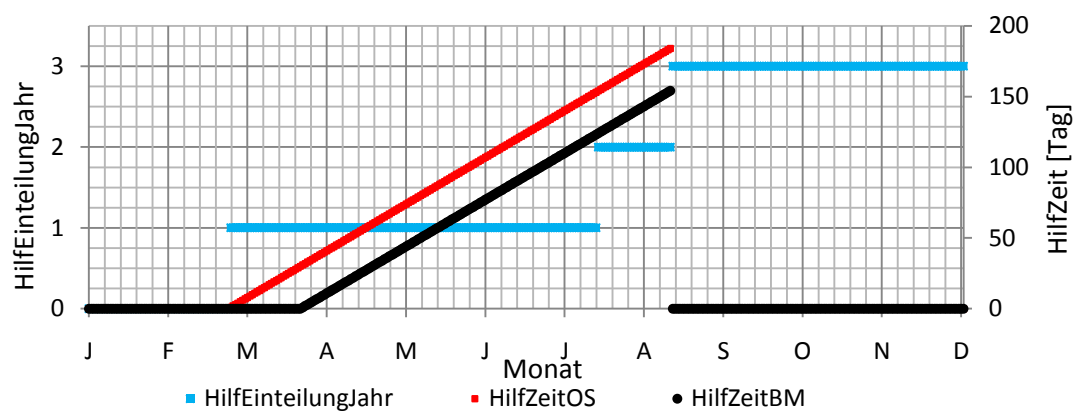
Die gebildete Biomasse  $M(\textit{Chara vulgaris})_t$  setzt sich hierbei aus den Elementen  $M_0$  (Oospore bzw. Biomasse des Vorjahres), der Zeit und dem Wachstumsfaktor (WF) zusammen.

Generell erfolgt der Zuwachs nur, wenn in **HilfEinteilungJahr** eine Zahl der Dimension eins, vier, fünf, sechs, sieben oder acht steht. Eine Null zeigt die Winterruhe an, eine Zwei stellt die stationäre Wachstumsphase dar, und eine Drei verdeutlicht die Sterbephase/Abklingphase. Diese drei Zahlen bleiben im Converter über die sechs

Jahre konstant. Im Nachfolgenden werden die einzelnen Werte in Bezug auf die jeweilige jährliche exponentielle Phase erläutert.

- Eins → exponentielle Phase im ersten Jahr
- Vier → exponentielle Phase im zweiten Jahr
- Fünf → exponentielle Phase im dritten Jahr
- Sechs → exponentielle Phase im vierten Jahr
- Sieben → exponentielle Phase im fünften Jahr
- Acht → exponentielle Phase im sechsten Jahr

In *Diagramm 3* ist dieser Sachverhalt zeitlich in Bezug auf das erste Jahr dargestellt.



**Diagramm 3** Zeitliche Darstellung der Hilfs-Converter

Auch wenn an den autochthonen Standorten erst Ende April ein Wachstum beobachtet wurde, beginnt aufgrund der oben beschriebenen Anlaufphase die exponentielle Phase zeitiger (Ende März). Ausgehend von der exponentiellen Phase des ersten Jahres, beginnt die **ZR OS**. Als Zeit wird der Converter **HilfZeitOS** benötigt, da nicht von der zeitlichen Abfolge der Länge der Simulation (vgl. *Run specs* in *iThink*®) ausgegangen werden kann.

Auch die Wachstumsgröße (**WG**) ist unverzichtbar. Die Höhe des Wertes wird im Modell vorgegeben, da keinerlei Angaben hierzu in der Literatur auffindbar sind. Der Wachstumsfaktor ist bei einem exponentiellen Wachstum immer positiv und größer als eins. So wird dieser definiert als (Gut, 2001)

**Gleichung 3** 
$$WF = 1 + \frac{p}{100}$$

Im Modellkonzept wird  $\frac{p}{100}$  als **WG** angegeben. Hierbei bezieht sich **WG** auf die Feuchtmasse. So ist der Wert immer kleiner als eins und eine rein willkürliche Zahl. Realistisch ist eine **WG** von 0,04. Das ergibt einen Wachstumsfaktor von 1,04. Im Modellkonzept beruht diese Größe auf einer Annahme. Ein Wachstumsfaktor von zwei

verdeutlicht folglich ein Wachstum um 100%. Eine Drei gibt ein Wachstum um 200% an.

So ergibt sich aus allen einfließenden Parametern das exponentielle Wachstum (**ZR OS**) mit folgender Gleichung im Modellkonzept AZA (ausgehend von einer Oospore):

**Gleichung 4** 
$$ZR\ OS = OS * (1 + WG)^{HilfZeitOS}$$

Bei **ZR BM** ist diese Funktion ähnlich aufgebaut. Allerdings ergeben sich hierbei einige Korrekturen. Da in **HilfZeitOS** (Diagramm 3) eine gewisse Anlaufphase (Verzögerung des Biomassewachstums) mit eingerechnet ist, wird diese in **HilfZeitBM** vernachlässigt. Folglich verringert sich die Zeit des exponentiellen Wachstums minimal und beginnt später. Auch die Ausgangsbiomasse am Anfang eines jeden Jahres verändert sich von Jahr zu Jahr. Hierfür werden die Hilfsgrößen **BM 365Tag**, **BM 730Tag**, **BM 2095Tag**, **BM 1460Tag** und **BM 1825Tag** benötigt. Die Elemente bestehen aus einer Struktur: **HISTORY(BM, Tag)**. Auf diese Art und Weise kann an einem spezifischen Tag ein bestimmter Wert bezüglich der Biomasseproduktion ausgegeben werden. Das exponentielle Wachstum der Folgejahre (**ZR BM**) wird in Gleichung 5 angegeben:

**Gleichung 5** 
$$ZR\ BM = BM_{Vorjahr} * (1 + WG)^{HilfZeitBM}$$

Die beiden Zuwachsraten (**ZR OS** und **ZR BM**) werden in der Einheit *g* definiert und in dem Converter **Zuwachs** miteinander addiert. Aber auch die **Stagnation** spielt eine wichtige Rolle. Diese wird im Bereich der **gebildeten Biomasse** genau definiert und erst dort näher erläutert.

#### iv) Globalstrahlung

Der dritte große Bereich ist die Globalstrahlung der Sonne. Hierfür wurden Werte des Deutschen Wetterdienstes (DWD) verwendet. Im Modell kommen drei verschiedene Jahre zum Einsatz (Abbildung 18): Normaljahr 1994, Nassjahr 2002 (viel Niederschlag, wenig Sonne) und Trockenjahr 2003 (viel Sonne, wenig Niederschlag). Außerdem ist die Globalstrahlung eines idealen Jahresgangs bekannt. Diese Werte stammen von der sogenannten *Walsby-Matrix*, die in Anlage 8 verfügbar ist (Walsby A. E., 1997).



**Abbildung 18** Schalter für vier verschiedene Jahre (*iThink*®)

Die Umrechnung der Rohdaten des DWD ( $\frac{J}{cm^2}$ ) erfolgt am Beispiel des Monats *Januar* (1. Januar bis 8. Januar) des Normaljahres 1994. In *Anlage 5* sind alle umgerechneten Daten (in  $\frac{mol}{m^2 \cdot d}$ ) des Normaljahres 1994, des Nassjahres 2002, des Trockenjahres 2003 und des Idealtagesgangs von *Walsby* aufgeführt.

In *Tabelle 12* wird die Umrechnung der Rohdaten des DWD beschrieben. Die Daten werden in der Einheit  $\frac{J}{cm^2}$  gemessen. Diese ist die ankommende Energie pro Flächeneinheit. Die Globalstrahlung wird in Tagessummen angegeben. Die Solarstrahlung, die auf die Erde trifft, hat einen Wellenlängenbereich  $\lambda$  von 300nm bis 3000nm. Sie besteht aus UV-Strahlung, sichtbarem Licht ( $\lambda \approx 380-750nm$ ) und Infrarotstrahlung. Allerdings kann nur der Wellenlängenbereich von 400 bis 750nm von den photoautotrophen Organismen auf der Erde genutzt werden. Diese fotosynthetisch nutzbare Strahlung wird deswegen auch als PAR (**P**hotosynthetisch **A**vailable **R**adiation) bezeichnet. Um die Globalstrahlung des DWD umrechnen zu können, wird angenommen, dass 45% der Strahlung PAR entsprechen (Tett, 2003).

**Tabelle 12** Umrechnung der Rohdaten in eine fotosynthetisch relevante Größe (NOJ 1994)

| <b>Tag</b> | <b>Rohdaten</b>  | <b>Umrechnung</b>                 |   |                              |                           |
|------------|--|-----------------------------------|---|------------------------------|---------------------------|
|            |  | <b>I</b>                          | <b>II</b>   | <b>III</b>                   |                           |
|            | Globalstrahlung<br>(Tagessummen)<br>[J/cm <sup>2</sup> ] | Umrechnung<br>in J/m <sup>2</sup> | 45% der<br>Globalstrahlung<br>ist PAR [J/m <sup>2</sup> ] | 1J = 4,15µE<br>(1µE = 1µmol) | $\frac{mol}{m^2 \cdot d}$ |
| 1. Jan.    | 154  | 1540000                           | 693000  | 2875950                      | 2,876                     |
| 2. Jan.    | 155  | 1550000                           | 697500  | 2894625                      | 2,895                     |
| 3. Jan.    | 156  | 1560000                           | 702000  | 2913300                      | 2,913                     |
| 4. Jan.    | 291  | 2910000                           | 1309500   | 5434425                      | 5,434                     |
| 5. Jan.    | 159  | 1590000                           | 715500  | 2969325                      | 2,969                     |
| 6. Jan.    | 217  | 2170000                           | 976500  | 4052475                      | 4,052                     |
| 7. Jan.    | 162  | 1620000                           | 729000  | 3025350                      | 3,025                     |
| 8. Jan.    | 227  | 2270000                           | 1021500   | 4239225                      | 4,239                     |

Bei der Umrechnung der Rohdaten des DWD wird eine Reflexion mit dazugehörigem Strahlungseinfallswinkel, Sonnenstand (Winter, Sommer, etc.) und Rauigkeit ausgeschlossen. Auch eine Absorption und eine Streuung, beispielsweise durch Wolken, werden im Modellkonzept nicht berücksichtigt. Allerdings wird die Extinktion im Wasserkörper der AZA und PBA Pöhla beachtet.

Zunächst werden die Daten des DWD ( $\frac{J}{cm^2}$ ) in  $\frac{J}{m^2}$  umgerechnet. Anschließend ergeben 45% der errechneten Werte PAR. Die Einheit bleibt  $\frac{J}{m^2}$ . Die Bestrahlungsstärke wird als

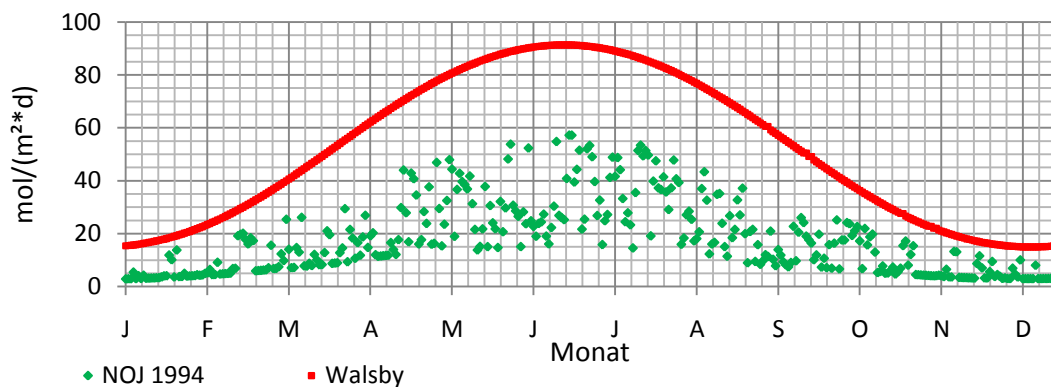


Einstein  $E$  definiert. Mögliche Einheiten können  $\frac{W}{m^2}$  oder  $\frac{E}{m^2 \cdot s}$  sein. Erstere stellt den Energiegehalt der Strahlung und letztere die Photonenflussdichte dar. Es gibt zahlreiche Sensoren (Lichtquantenzähler), wie etwa einen PAR-Sensor, der nicht die ankommende Energie pro Flächeneinheit berechnet, sondern gleich die Anzahl der ankommenden Photonen, die relevant für die Fotosynthese sind. Um nun die umgerechnete PAR (45% der Globalstrahlung) in  $\frac{E}{m^2 \cdot d}$  umwandeln zu können, werden in der Literatur zwei Umrechnungsformeln angegeben (der Tag  $\left[ \frac{E}{m^2 \cdot d} \right]$  kommt hinzu, weil es sich bei den Rohdaten um Tagessummen handelt) (Tett, 2003):

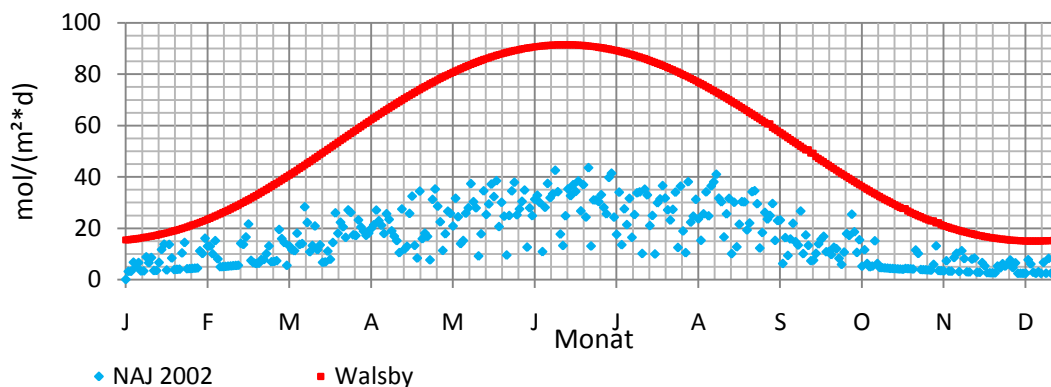
$$1J \text{ der PAR} \triangleq 4,15E$$

$$1E \triangleq 1mol$$

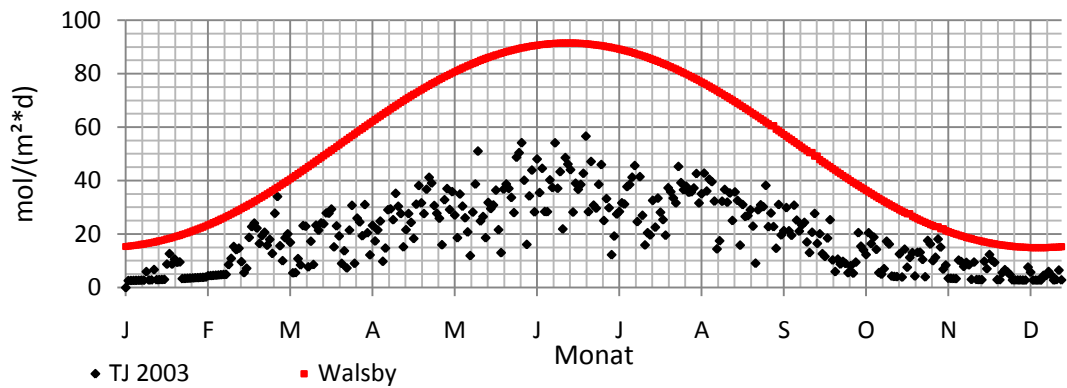
Anschließend werden die Werte in  $\frac{mol}{m^2 \cdot d}$  angegeben. In den *Diagramm 4, 5 und 6* werden die umgerechneten Rohdaten der einzelnen Jahre mit dem Idealtagesgang von *Walsby* verglichen. Generell können die Werte von *Walsby* nie überschritten werden, da hier ein Idealtag angenommen wird. Dies bedeutet eine wolkenlose Atmosphäre mit keinerlei Wechselwirkungen und Einflüssen auf die Globalstrahlung bzw. der Photonenflussdichte.



**Diagramm 4** Vergleich der Wetterdaten (NOJ 1994) mit *Walsby*



**Diagramm 5** Vergleich der Wetterdaten (NAJ 2002) mit *Walsby*



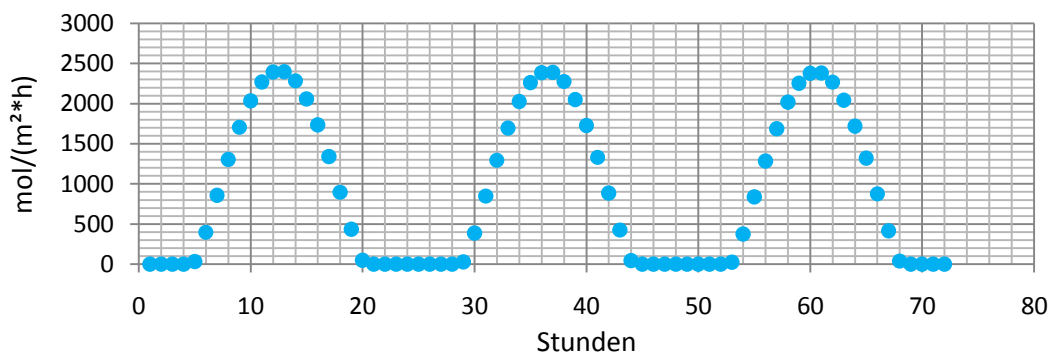
**Diagramm 6** Vergleich der Wetterdaten (TJ 2003) mit *Walsby*

Was muss bei der Verwendung der *Walsby*-Matrix beachtet werden? Allgemein werden die Daten in der Einheit  $\frac{\text{mol}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$  ausgegeben (es handelt sich um Tagessummen). Die größte Beachtung gilt der Koordinateneingabe. Mittels dem Programm *GoogleEarth™* (Google) konnten die genauen Koordinaten des Standortes Pöhla ermittelt werden:

*Gradmaß:* 50° 29' 37.00''

*Dezimalgrad:* 50,4936°

Das Dezimalgradmaß wird in die Matrix eingefügt. Wichtig ist das für den Sonnenstand. Errechnet werden die dazugehörigen Tagessummen mit Hilfe von 288 5-Minuten-Werten für jeden Tag. Um gegebenenfalls Assimilations- und Dissimilationsprozesse genauer darzustellen, bestünde die Möglichkeit einzelne Tagesgangwerte zu ermitteln (aus jeweils zwölf 5-Minuten-Werte). *Diagramm 7* beschreibt die einzelnen Tagesgänge von drei Tagen.



**Diagramm 7** Idealtagesgangswerte von *Walsby*

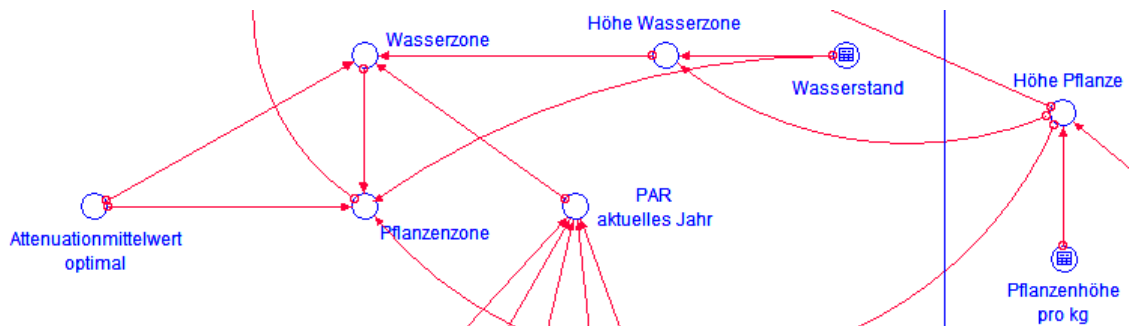
Mit Hilfe von *Diagramm 7* könnten so die Photonenstrahlungswerte mit den Daten des DWD verglichen werden. Durch diese Simulation bestünde unter anderem die Möglichkeit, biologische Prozesse zu berücksichtigen, die sich innerhalb eines Tages unterschiedlich verhalten (Assimilation, Dissimilation, etc.). Die Daten für die einzelnen

Tagesgänge (*Anlage 6*) sind vorhanden und können unter Berücksichtigung zunehmender biologischer Prozesse in das Modellkonzept eingebaut werden.

Im Modellkonzept kann zwischen den einzelnen Jahren gewählt werden. Dazu dient der Schalter **Auswahl Jahr** (*Abbildung 18*). Je nach Zahl (von eins bis vier) werden die zur Auswahl stehenden Photonenflussdichten mit 365 Werten pro Jahr verwendet:

- 1 - **PAR NOJ**
- 2 - **PAR NAJ**
- 3 - **PAR TJ**
- 4 - **PAR Walbsy.**

Wenn die Entscheidung gefallen ist, wird anschließend die Abschwächung der Strahlung berechnet (*Abbildung 19*).



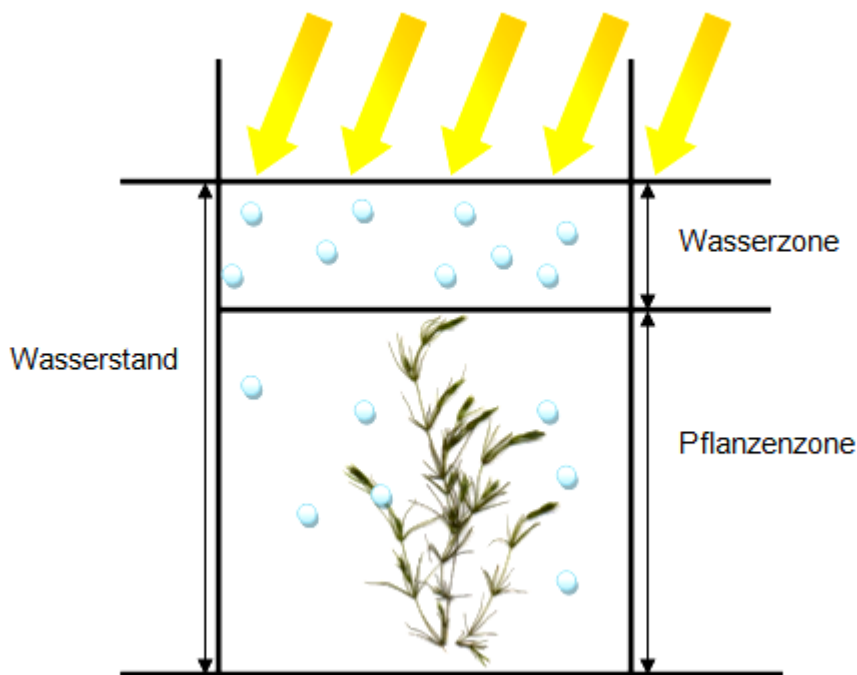
**Abbildung 19** Strahlungsbereich in iThink®

Hierbei werden zwei Zonen definiert - die **Wasserzone** und die darunter liegende **Pflanzenzone** (*Abbildung 20*). Abhängig sind diese von der Höhe der Pflanze bzw. vom Wachstum. Im Modellkonzept entsprechen 100g der Pflanzenbiomasse 30cm Pflanzenhöhe (**Pflanzenhöhe pro kg**). So wird im Converter **Höhe Pflanze** eine Verhältnisgleichung definiert:

**Gleichung 6**

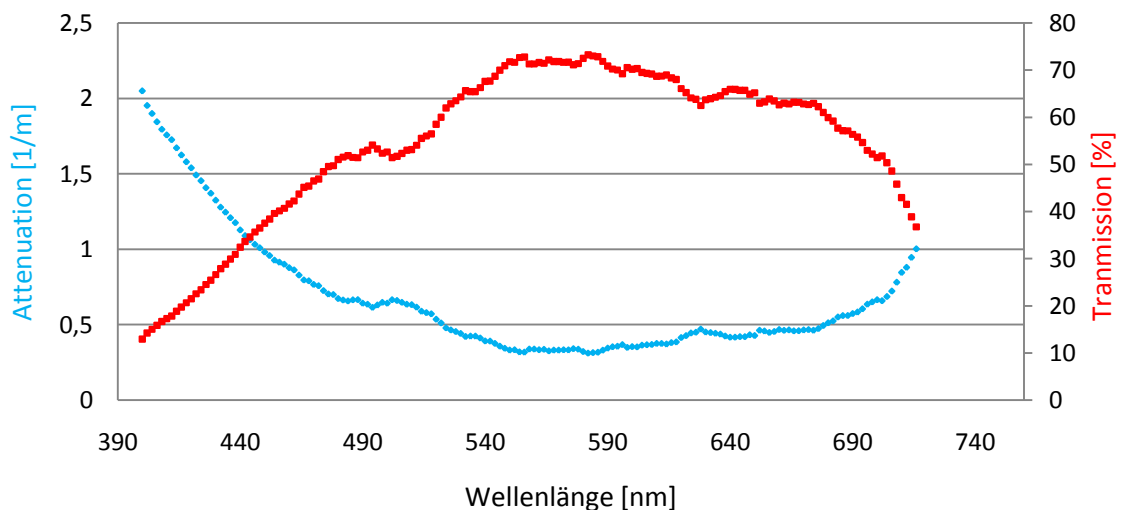
$$\frac{1000g}{BMg} = \frac{3m}{xm}$$

Da nun die Höhe einer *Chara vulgaris*-Pflanze mit jedem Tag neu berechnet wird, kann auch abgeschätzt werden, wie hoch die **Wasserzone** ist. Berechnet wird der Bereich anhand der Höhe des **Wasserstandes**, der aufgrund der Simulation von optimalen Bedingungen variabel sein kann. Prinzipiell wird aber ein **Wasserstand** von 1m angenommen, um die Ergebnisse mit denen aus der PBA Pöhla (Modellkonzept PBA) vergleichen zu können. Im Converter **Höhe Wasserzone** erfolgt ihre Berechnung anhand der Pflanzenhöhe.



**Abbildung 20** Darstellung der Wasser- und der Pflanzenzone

Um die Abschwächung der PAR-Strahlung berechnen zu können, benötigt man einen Attenuationskoeffizienten (Extinktionskoeffizienten). Die Lichtattenuation gibt die Abschwächung des Lichtes in einem Wasserkörper an, verursacht durch optisch aktive Wasserinhaltsstoffe. Der Attenuationskoeffizient wurde durch *Schubert & Marquardt* gemessen (Schubert & Marquardt, 2009).



**Diagramm 8** Attenuation und Transmission (AZA) im Vergleich

Da die Werte in unterschiedlichen Wellenlängen angegeben sind und durch Datenmangel im erarbeitenden Modell nicht berücksichtigt werden können, wird anhand der gemessenen Daten von *Schubert & Marquardt* der Durchschnittswert aus

dem Attenuationskoeffizienten  $K$  gebildet, sodass sich folgende Konstante ergibt (Converter **Attenuationsmittelwert AZA**):

**Gleichung 7** 
$$K_0 = 0,672 \left[ \frac{1}{m} \right]$$

$K_0$  gibt hierbei die optimalen Bedingungen innerhalb der AZA wieder. Auch die Transmission  $T$  kann aus  $K_0$  berechnet werden (*Diagramm 8*). Diese gibt an, wie viel Prozent des Lichtes am Grund durch die Abschwächung noch ankommt (Steffens).

**Gleichung 8** 
$$T = \frac{1}{e^{K_0}} \quad [K_0 = -\log T = \log \frac{1}{T}]$$

Ausgehend von  $K_0$ , kann die Strahlungsabschwächung in Abhängigkeit der Tiefe angegeben werden (Arbeitsgruppe Meeresphysik, SS 2006).

**Gleichung 9** 
$$E_d(z) = E_d(z_0) * e^{-K_0 * z}$$

Sowohl die Werte der **Wasser-** als auch die der **Pflanzenzone** werden unterschiedlich berechnet. Erstere folgt der Berechnung, wie in *Gleichung 9* beschrieben. Die Strahlung an der Oberfläche  $E_d(z_0)$  ist bekannt (*PAR*). Auch  $K$  wurde gemessen.  $Z$  gibt die Tiefe an, die die *Wasserzone* in Abhängigkeit von der Zeit vorweist. Die Berechnung der Strahlungsabschwächung innerhalb der **Wasserzone** erfolgt bis zur Grenzfläche zur **Pflanzenzone**. Der darunter liegende Bereich berechnet sich infolge einer Integralbildung (aus *Gleichung 9* ergibt sich *Gleichung 10*), unter der Annahme, dass sich der Assimilationsprozess über die Pflanzenhöhe konstant verhält.

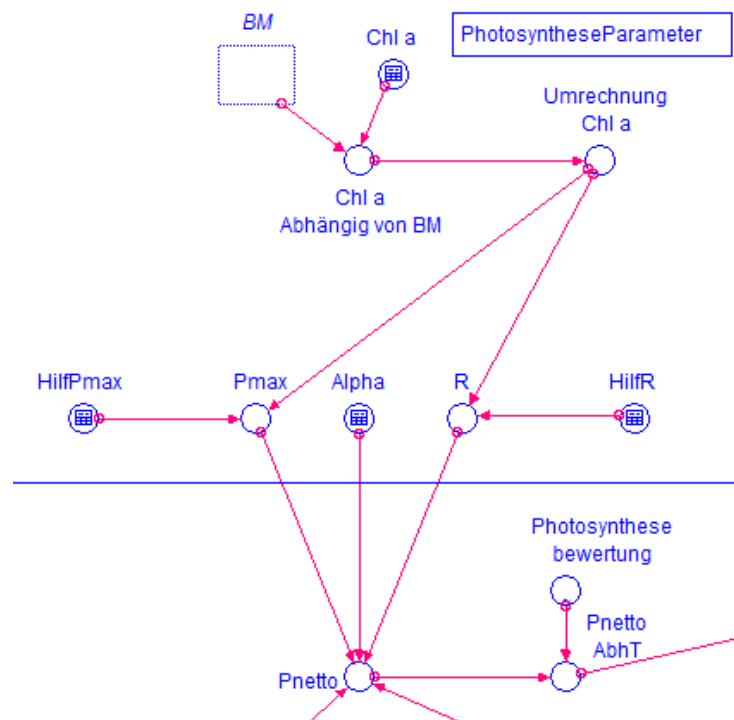
**Gleichung 2** 
$$E_d(z) = -\frac{1}{K_0} * E_d(z_{\text{Grenzfläche}}) * (e^{-K_0 * z_2} - e^{-K_0 * z_1})$$

Die tatsächlich ankommende Strahlung an *Chara vulgaris* innerhalb der Pflanzenzone wird als Ausgangsstrahlung für die Berechnung der Nettofotosynthese verwendet. Hierfür müssen verschiedene Fotosyntheseparameter zum Einsatz kommen. *Abbildung 21* stellt die Umsetzung in *iThink*® dar.

## v) Fotosyntheseparameter

Insgesamt werden vier Einflussgrößen benötigt:  $P_{max}$ ,  $R$ ,  $\alpha$  und *Chl a* (vgl. *Abschnitt 2.3.1*). Die Messungen von Schubert & Marquardt ergaben, dass der *Chl a*-Gehalt unter optimalen Bedingungen (AZA)  $0.49 \frac{\mu g}{mg}$  beträgt (Schubert & Marquardt, 2007). Hierbei wird der Gehalt an **Chl a** mit der Menge der gebildeten Biomasse (**BM**) kombiniert, sodass eine Abhängigkeit zwischen beiden erstellt werden kann. Anschließend erfolgt eine Division durch eintausend, da die Biomasseproduktion in  $g$  angegeben wird (Converter **Chl a Abhängig von BM** [ $\mu g$ ]). Um diesen Wert aber mit

den anderen Fotosyntheseparametern kombinieren zu können, muss anschließend eine Umrechnung auf  $g$  erfolgen (Converter **Umrechnung Chl a**). Die Ermittlung von  $P_{max}$  und  $R$  durch Schubert & Marquardt ergab für  $P_{max} = 37,56 \frac{mmol\ O_2}{h * g\ Chl\ a}$  (Converter **HilfP<sub>max</sub>**) und für  $R = -15 \frac{mmol\ O_2}{h * g\ Chl\ a}$  (Converter **HilfR**). Beide Parameter werden mit dem umgerechneten **Chl a**-Gehalt, der Multiplikation mit vierundzwanzig (Umrechnung auf einen Tag) und der Division durch eintausend kalkuliert (**P<sub>max</sub>**, **R**).  $\alpha$  ist eine einheitenlose Größe von 0,85 (Schubert & Marquardt, 2009). Alle vier Einflussgrößen der Nettofotosynthese beziehen sich auf eine Beprobung von *Chara vulgaris*, die in der AZA an einem Schattenstandort gewachsen sind. Für die Ergebnisanalyse ist es aber notwendig, diese Parameter zu verändern, um eine Diskussionsgrundlage zu erhalten. So folgt ein Vergleich der Primärproduktionsleistung am Lichtstandort und Schattenstandort unter optimalen Bedingungen.



**Abbildung 21** Darstellung der Fotosyntheseparameter in iThink®

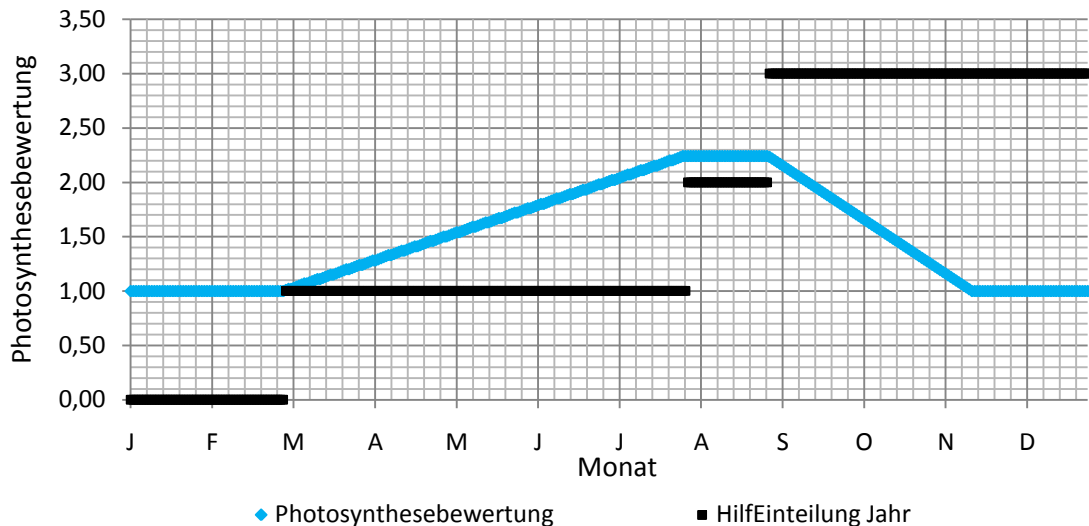
Die Werte der Nettofotosynthese ( $P_{netto}$ ) errechnen sich mit Hilfe von Gleichung 3 und erhalten die Einheit  $\frac{mol\ O_2}{m^2 * d}$ :

**Gleichung 3**

$$P_{netto} = P_{max} * \tanh * \frac{\alpha * I}{P_{max}} + R$$

Die Größe  $h$  gibt die aktuelle Höhe der Pflanze an.  $I$  ist die tatsächliche Strahlung, die durch die Abschwächung noch an der Pflanze herrscht. Da die Fotosynthese stark temperaturabhängig ist, tritt die van't Hoffsche Regel in Kraft. Mit steigender Temperatur nimmt auch die Fotosyntheseleistung zu. Das heißt, wird die Temperatur

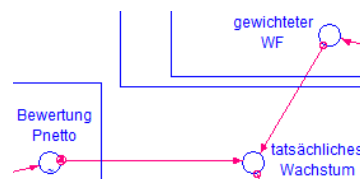
um 10°C erhöht, so verdoppelt sich die Reaktionsgeschwindigkeit. Das Optimum der Fotosynthese liegt bei etwa 20 bis 30°C Außentemperatur. Unter der Annahme, dass die gemessene Fotosyntheseleistung an jedem Tag eines Jahres konstant bleibt (durch die Definition des Zuwachses wird der zeitliche Anwendungsbereich vorgegeben), ist diese nun abhängig von der Temperatur. Die Temperaturregelung wird durch eine **Fotosynthesebewertung** in *iThink*® eingebaut, die auf den Bereich des Zuwachses abgestimmt ist.



**Diagramm 9** Fotosynthesebewertung in *iThink*®

In Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden. ist die **Fotosynthesebewertung** und **HilfEinteilungJahr** dargestellt. Erstere richtet sich nach den einzelnen Phasen eines Jahres.

Wenn der Wert für die temperaturabhängige Nettofotosynthese negativ ist, wird dieser durch den der Fotosynthesebewertung dividiert, andernfalls erfolgt eine Multiplikation beider, sodass sich die Werte der Nettofotosynthese vergrößern. Eine Bewertung der Nettofotosynthese ist in *iThink*® eingebaut; allerdings wurde am Anfang definiert, dass in der AZA optimale Bedingungen für das *Chara vulgaris*-Wachstum vorliegen, sodass die gesamte Wertung mit einer Eins erfolgt und kein Einfluss auf die Entwicklung definiert wird.

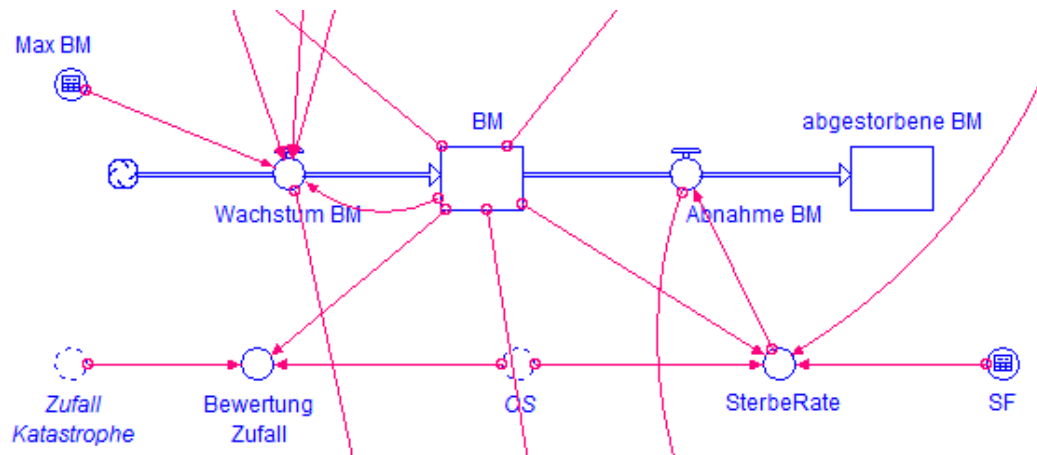


**Abbildung 22** Darstellung des tatsächlichen Wachstums in *iThink*®

Die totale Berechnung des **tatsächlichen Wachstums** wird in *Abbildung 22* dargestellt. Hierbei wird eine Zahl ausgegeben (kleiner als eins), die von dem

**gewichteten Wachstumsfaktor** und von der **Bewertung  $P_{netto}$**  abhängig ist. So wird eine Grundlage für die Bildung der Biomasse geschaffen.

## vi) Biomasseentwicklung von *Chara vulgaris*



**Abbildung 23** Darstellung der Bildung der Biomasse in iThink®

In **Abbildung 23** regelt der Einfluss **Wachstum BM** den Zuwachs der Biomasse pro Tag. Die Biomasse wird hierbei in *g* angegeben. Auf den Einfluss wirken drei Größen: **Max BM**, **Stagnation** und **Zuwachs**. Wenn die Biomasseproduktion (im Stock **BM**) noch unter einem bestimmten Wert in **Max BM** liegt, erfolgt automatisch ein **Zuwachs**, andernfalls wird eine **Stagnation** mit einem Zuwachs von null eingeleitet. So wird die Sterberate gleich der Zuwachsrate definiert. **Max BM** wurde so gewählt, dass den Beobachtungen an autochthonen Standorten gerecht wird. Der Wert wurde deswegen auf 100*g* festgelegt, da angenommen wurde, dass 100*g* **BM** 30*cm* Pflanzenhöhe entsprechen. Im Modell kann so die Pflanzenentwicklung kaum 30*cm* überschreiten.

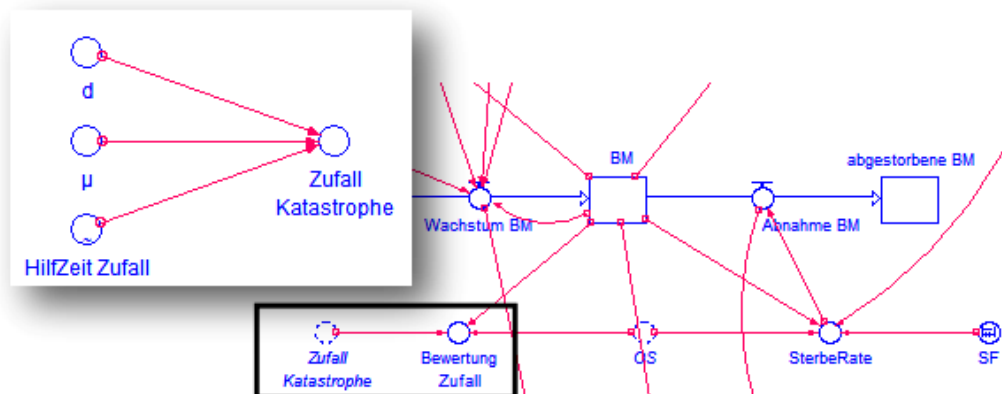
Die Abnahme der Biomasse wird durch die **SterbeRate** definiert. Wenn die Menge der Biomasse (**BM**) kleiner als die Masse einer Oospore (**OS**) ist, bedeutet das eine Sterberate von Null. Ansonsten wird sie durch **HilfEinteilungJahr** geregelt, wenn dieser gleich Drei ist. Hierbei wird das Absterben der Biomasse durch den Sterbefaktor **SF** reguliert. Ein realistischer Wert für den **SF** sind 4% der gebildeten Biomasse pro Tag. In den Ergebnissen wird die Auswirkung der Veränderung des Sterbefaktors aber noch näher erläutert. Die abgestorbene Biomasse wird im darauffolgenden Stock aufgefangen.

## vii) Zufall einer Katastrophe in den Wintermonaten

Um das Modell in naher Zukunft für Anwender attraktiver zu machen, kann auch auf einen Zufall der Härte der Winter zurückgegriffen werden (**Abbildung 24**). Hier tritt eine Normalverteilung in Kraft, wobei  $\mu$  (Erwartungswert) und  $\sigma$  (Standardabweichung) die



Einflussgrößen darstellen. In *iThink*® können direkt vorgefertigte Funktionen für verschiedene Wahrscheinlichkeitsverteilungen verwendet werden.



**Abbildung 24** Darstellung des Zufalls einer Katastrophe in *iThink*®

Im Modell wird die Simulation einer Katastrophe durchgeführt, wobei ein Absterben bis zu 100% möglich ist. Das erneute Wachstum würde wieder bei einer Oospore beginnen. Die Zufallsvariable  $X$  stellt das Eintreten einer Katastrophe dar. Der Merkmalsraum ( $\Omega = \{0,7; 0,8; 0,9; 1\}$ ) liegt zwischen 70% und 100% Absterben bei einer Wahrscheinlichkeitsverteilung von  $p_i = \frac{1}{4}$ .

Für den Erwartungswert ergibt sich 0,85 (Berechnung durch Gleichung 4)

**Gleichung 4** 
$$E(x) = \sum_i^{\infty} p_i x_i$$

Als Standardabweichung wird ein Wert von 0,25 angenommen, da die zufällige Schwankung des Absterbens zwischen 0,7 und 1 schwanken soll. So ergibt sich eine Normalverteilung im Converter **Zufall Katastrophe** von  $N(\bar{x}, \sigma^2)$ . Dies gilt nur für die Wintermonate (01.11. bis 31.01. - **HilfZeitZufall**).

## viii) Schadstoffeinlagerung in *Chara vulgaris*

Den letzten großen Bereich bildet die Schadstoffeinlagerung. Hierbei wird vor allem die Menge der einzubauenden Elemente benötigt (Tabelle 13).

**Tabelle 13** Schadstoffeinlagerung in der Pflanze

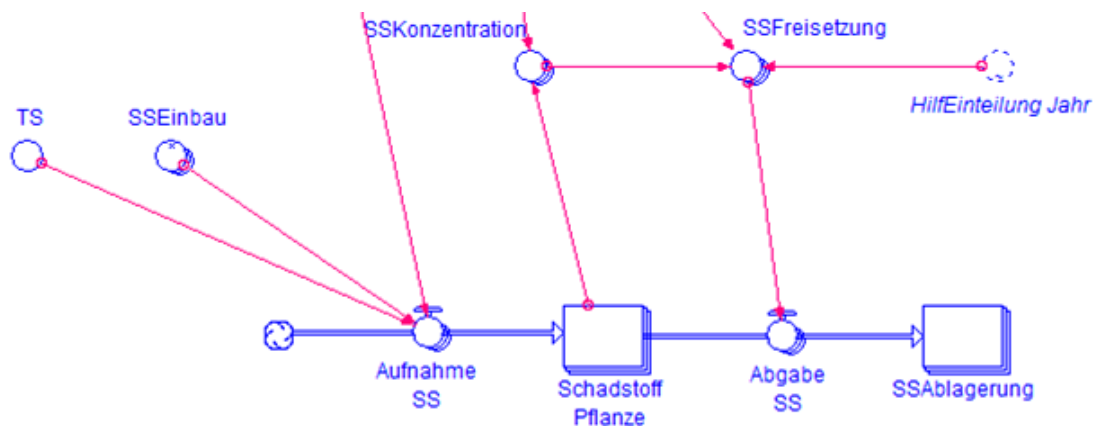
| Parameter    | Schadstoffkonzentration<br>in der Biomasse (AZA) |       |
|--------------|--|-------|
| $Na^+$       | 380  | mg/kg |
| $K^+$        | 4140   | mg/kg |
| $Mg^{2+}$    | 3565   | mg/kg |
| $Ca^{2+}$    | 256000   | mg/kg |
| $Fe^{2+/3+}$ | 2055   | mg/kg |

|            |      |       |
|------------|------|-------|
| $Mn^{2-}$  | 1700 | mg/kg |
| $^{226}Ra$ | 525  | Bq/kg |

Es wird angenommen, dass die gemessene Schadstoffkonzentration in der Biomasse das ganze Jahr über konstant bleibt. Der Einlagerungsprozess konzentriert sich auf die getroffenen Hypothesen (S.31). Die Stoffaufnahme erfolgt im Zuge der Fotosyntheseleistung (3. Hypothese) mit der daraus resultierenden Biomasseentwicklung (2. Hypothese).

In *Abbildung 25* wird die Umsetzung in *iThink*® abgebildet. Da eine Biomassebeprobung sich immer auf die Trockenmasse bezieht, wird ein Hilfsvektor **TS** benötigt. Dieser führt eine Umrechnung in Feuchtmasse durch (23% der Feuchtmasse ergeben die Trockenmasse).

Mit Hilfe des Wachstums der Biomasse (**Wachstum BM**), des **SSEinbaus** (Import) und der **TS** lässt sich die Aufnahme der Schadstoffe (**Aufnahme SS**) definieren. Der Stock **Schadstoff in der Pflanze** erhält die Einheit *mg*.



**Abbildung 25** Darstellung der Schadstoffkonzentration in *iThink*®

Die Werte für die Schadstoffkonzentrationen der jeweiligen Elemente (**SS-Konzentration**) werden über zwei Stocks ermittelt (**BM**, **Schadstoff Pflanze**), wobei die Angabe in  $\frac{mg}{kg}$  erfolgt. Die Abgabe der Schadstoffe tritt während der Abklingphase in Kraft; diese ist mit dem Abfluss **Abnahme BM** gekoppelt. Über eine Produktbildung der Werte in der **SSKonzentration** mit denen in der abgegebenen Biomasse wird die **SSFreisetzung** (Einheit *mg*) definiert, die anschließend in den Abfluss **Abgabe SS** eingefügt wird. Die freigesetzten Schadstoffe werden danach in einem nächsten Stock aufgefangen (**SSAblagerung**).

Die Schadstoffaufnahme erfolgt proportional zum Biomassewachstum. Wenn Biomasse abstirbt, verbleibt der Schadstoff in der toten Substanz. Verstoffwechsel-

ungsprozesse werden dabei im Modellkonzept nicht berücksichtigt und sollen nicht Gegenstand der Modellierung sein.

*Abbildung 26* zeigt eine vereinfachte schematische Darstellung der Schadstoffeinlagerung in der Pflanze und der nachfolgenden toten Biomasse am Boden.

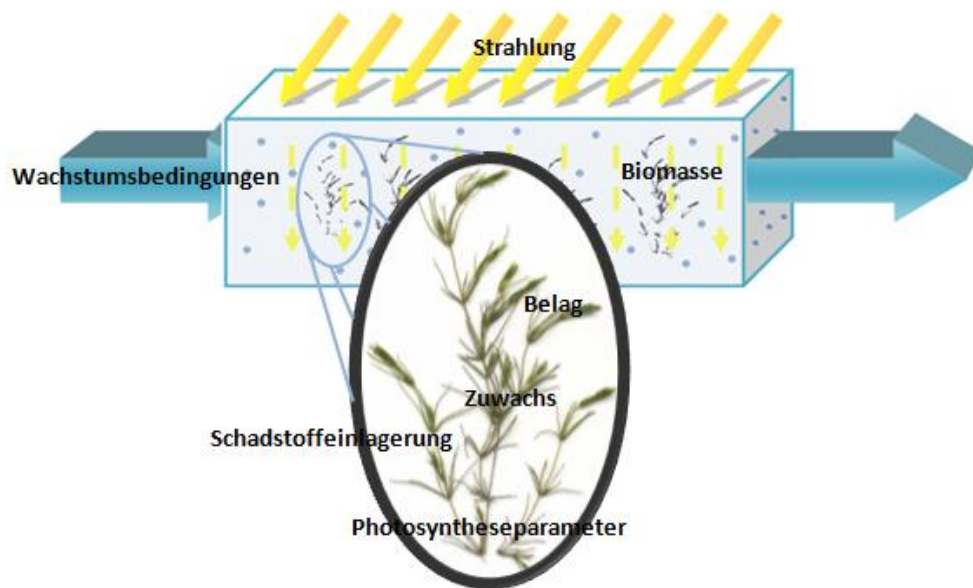


**Abbildung 26** Schadstoffeinlagerung in *Chara vulgaris*

### 3.1.3 Extremstandort (Modellkonzept PBA)

Das Modellkonzept PBA ist in *Anlage 7 (Modellkonzept PBA.itm)* enthalten.

Das Konzept für die Modellierung der Wachstumsdynamik und der Schafstoffaufnahme von *Chara vulgaris* unter den gegebenen Bedingungen in der PBA Pöhla weist sieben große Teilbereiche auf (*Abbildung 27*). Im Vergleich zu den optimalen Bedingungen kommt hier lediglich der Bereich „Belag“ hinzu, der auf das Wachstum von *Chara vulgaris* negative Auswirkungen hat.



**Abbildung 27** Darstellung der sieben Teilbereiche des Modellkonzeptes unter extremen Bedingungen

Um einen ersten Eindruck über die Situation in der PBA Pöhla zu erhalten, werden in *Tabelle 14* die WIS des Zulaufs (Messpunkte m-224 und m-232) und des Ablaufs (Messpunkte m-225 und m-233) tabellarisch abgebildet.

**Tabelle 14** Übersicht über die WIS des Zulaufs und des Ablaufs der Becken 3/4

|    | <i>Parameter</i>              | <i>Einheit</i>    | <i>Zulauf</i> | <i>Ablauf</i> |
|----|-------------------------------|-------------------|---------------|---------------|
| 1  | Q                             | m <sup>3</sup> /d | 173,47        | 173,47        |
| 2  | Eh                            | mV                | 386,25        | 370,31        |
| 3  | Lf                            | mS/cm             | 0,49          | 0,48          |
| 4  | Ca <sup>2+</sup>              | mg/l              | 49,55         | 47,65         |
| 5  | Fe <sup>2+/3+</sup>           | mg/l              | 1,02          | 0,46          |
| 6  | Mn <sup>2+</sup>              | mg/l              | 0,17          | 0,09          |
| 7  | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>  | mg/l              | 0,13          | 0,10          |
| 8  | HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | mg/l              | 315,63        | 309,38        |
| 9  | GH                            | °dH               | 11,05         | 10,68         |
| 10 | As <sup>4+</sup>              | µg/l              | 1050,42       | 957,46        |
| 11 | Ba <sup>2+</sup>              | µg/l              | 1317,50       | 1272,50       |

|    |                               |       |         |         |
|----|-------------------------------|-------|---------|---------|
| 12 | $^{226}\text{Ra}$             | mBq/l | 2964,38 | 2707,81 |
| 13 | pH                            |       | 7,82    | 8,10    |
| 14 | O <sub>2</sub>                | mg/l  | 7,49    | 7,78    |
| 15 | Na <sup>+</sup>               | mg/l  | 36,73   | 38,20   |
| 16 | K <sup>+</sup>                | mg/l  | 6,58    | 6,65    |
| 17 | Mg <sup>2+</sup>              | mg/l  | 17,78   | 17,80   |
| 18 | Al <sup>3+</sup>              | mg/l  | 0,02    | 0,02    |
| 19 | Cl <sup>-</sup>               | mg/l  | 3,92    | 4,50    |
| 20 | SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> | mg/l  | 5,00    | 5,00    |
| 21 | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>  | mg/l  | 0,01    | 0,01    |
| 22 | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>  | mg/l  | 1,00    | 1,00    |
| 23 | PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> | mg/l  | 0,10    | 0,10    |

Die Elemente von eins bis einschließlich zwölf weisen im Zulauf eine höhere Konzentration der WIS als im Ablauf auf. Die darunter liegenden Parameter verhalten sich umgekehrt. Für die WIS, die in das Modell eingefügt werden sollen, kommen ausschließlich die Werte des Zulaufs (Mittelwert aus *m-224* und *m-232*) zum Einsatz. Wie in *Abschnitt 2.3* beschrieben, spielen der Belag und die  $^{226}\text{Ra}$ -Abtrennung eine wichtige Rolle. Deutlich wird dieser Sachverhalt in *Tabelle 14* dargestellt. Die Konzentration des  $^{226}\text{Ra}$  vermindert sich aufgrund der Abtrennleistung der *Characeae* in den Becken. Auch die Menge an gelöstem Eisen verringert sich. Calcium und Bicarbonat werden ebenfalls in den Becken abgesetzt und in die *Characeae* abgelagert. Diese Elemente werden beispielsweise für die Bildung des Calzitgerüsts ( $\text{CaCO}_3$ ) benötigt.

### i) Wachstumsbedingungen und Zuwachs

Der erste große Bereich **Wachstumsbedingungen** ist äquivalent zu den optimalen Bedingungen aufgebaut. Lediglich die Werte für die **WIS** (siehe Zulauf in *Tabelle 14*) sind in Bezug auf das Modellkonzept AZA verschieden. Der Vektor erhält die Dimension *WIS\_WasserPBA*. Die Bewertung des **gewichteten Wachstumsfaktors** resultiert so auf Grundlage der veränderten Wasserparameter mit unterschiedlichen Ergebnissen zum optimalen Standort.

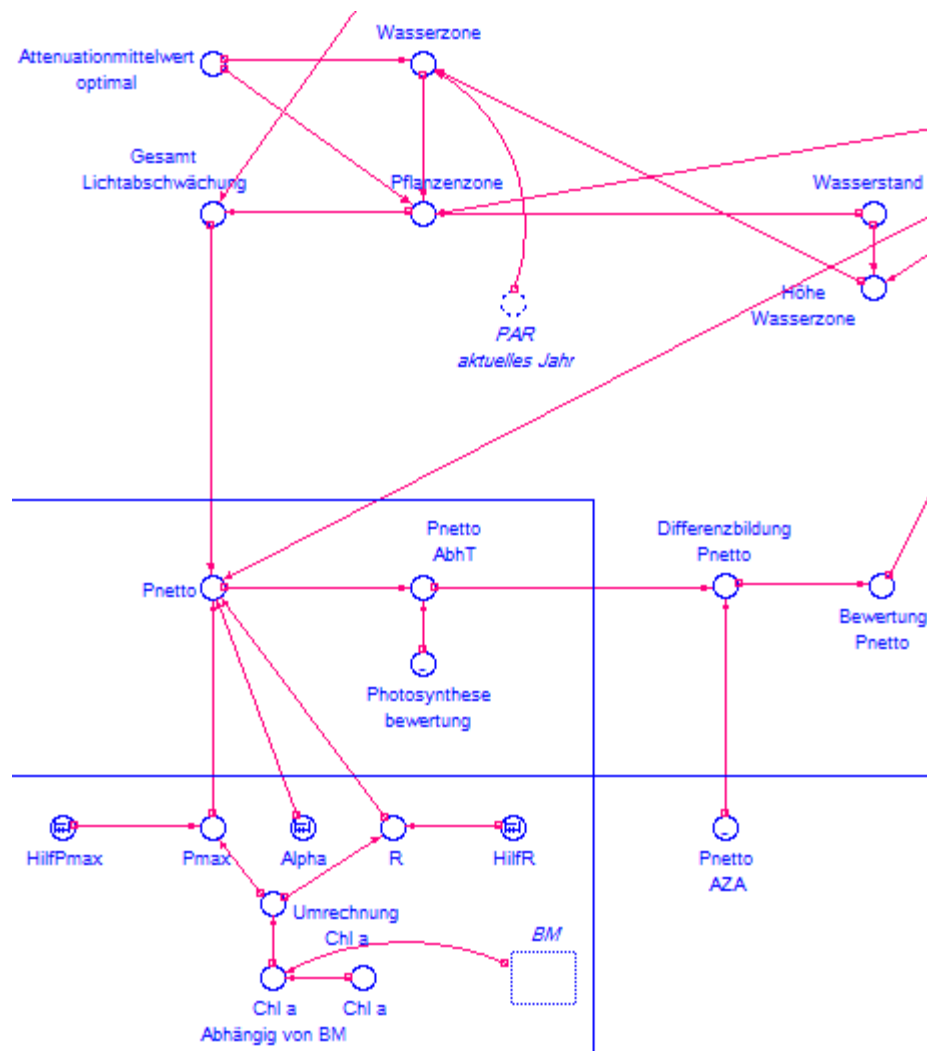
Auch der Bereich des **Zuwachses** entspricht dem unter optimalen Bedingungen. Hierbei sind alle Elemente äquivalent.

### ii) Fotosyntheseparameter und Globalstrahlung

Der Bereich der **Fotosyntheseparameter** folgt im Modellkonzept des Extremstandortes dem gleichen Aufbau wie das unter optimalen Bedingungen. Die Elemente

$HilfP_{max}$ ,  $HilfR$ ,  $Chl\ a$  und  $\alpha$  weisen die gleichen Werte wie die unter optimalen Bedingungen auf. Schubert & Marquardt ermittelten zwar die Fotosyntheseparameter bezüglich verkrusteter *Chara vulgaris* in der PBA, doch da im Modellkonzept PBA die Bewertung erst später erfolgt, wurden hierfür die optimalen Bedingungen als Grundlage für die Primärproduktionsleistung definiert.

Der Bereich für die Berechnung der Lichtabschwächung und der Strahlungsumrechnung folgt dem Beispiel im Modellkonzept AZA. Hier treten keine Veränderungen auf. Die **gesamte Lichtabschwächung** wird mit einer Bewertung des Belages kombiniert, worauf unter Punkt 3.1.3 iii) näher eingegangen wird. Auch die Höhe des **Wasserstandes** sowie die Definition der **Pflanzenhöhe** in Abhängigkeit von der Biomassebildung sind äquivalent zum optimalen Standort.



**Abbildung 28** Darstellung der Bereiche Strahlung und Fotosynthese

In Abbildung 28 werden die Bereiche der **Strahlung** und die der **Fotosyntheseparameter** des Modellkonzeptes PBA dargestellt. Um die Fotosyntheseleistung von *Chara vulgaris* bewerten zu können, müssen Vereinfachungen vorgenommen werden.

Am besten schien es, die Fotosyntheseleistung unter optimalen Bedingungen ( $P_{\text{netto}}$  **AZA**) mittels eines Exports aus dem Modellkonzept AZA herauszufiltern, um sie anschließend in das Modellkonzept PBA einzugliedern. Diese Primärproduktion verdeutlicht nun einhundert Prozent. Anschließend wird eine Differenz zwischen den beiden Werten der Nettofotosynthesen gebildet (**Differenzbildung**  $P_{\text{netto}}$ ). In **Bewertung**  $P_{\text{netto}}$  werden die neuen Ergebnisse unter verschiedenen Annahmen berechnet. *Tabelle 15* zeigt das Wertungssystem der Primärproduktion. Negative Differenzbildungen werden nach der gleichen Art und Weise bewertet.

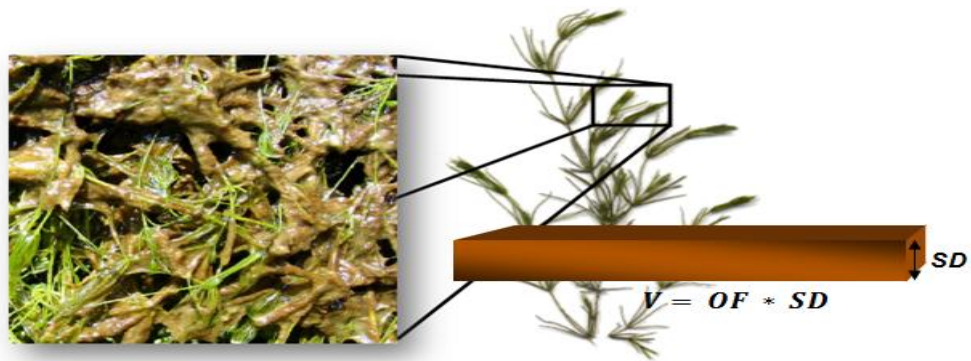
**Tabelle 15** Annahmen bei der Bewertung der Nettofotosynthese

| Differenz | Wachstumsbewertung | Differenz | Wachstumsbewertung |
|-----------|--------------------|-----------|--------------------|
| 0         | 1                  | 1,2       | 0,4                |
| 0,2       | 0,9                | 1,4       | 0,3                |
| 0,4       | 0,8                | 1,6       | 0,2                |
| 0,6       | 0,7                | 1,8       | 0,1                |
| 0,8       | 0,6                | 2         | 0                  |
| 1         | 0,5                | >2        | 0                  |

Die Wachstumsannahmen sind immer nur tagesabhängig und wirken sich nicht komplett auf das *Chara vulgaris*-Wachstum aus. Die Entwicklung der Pflanze kann so an einem Tag entweder schnelles oder langsames Wachstum aufzeigen.

### iii) Belag auf *Chara vulgaris*

Der große Bereich **Belag** spielt im Modellkonzept PBA eine wichtige Rolle. Er beeinflusst das Wachstum der *Characeae* am meisten, da er sich auf die *Characeae*-Pflanzen in der PBA absetzt. So kann die Strahlung nicht mehr optimal bei den *Characeae*-Pflanzen ankommen – der Belag hat eine gewisse Schattenwirkung. In der PBA wurden diverse Anlagen eingebaut (Kaskaden, Schwimmmatten, vgl. *Abschnitt 2.3*), die die Eisenkonzentration im Wasser verringern sollten. Durch den Vergleich von Zulauf und Ablauf des Wassers (*Tabelle 14*) kann davon ausgegangen werden, dass etwa 50% des Eisens (*EisenVerwendung aus Wasser*) in den Becken 3/4 verbleibt und nicht mehr durch die Abläufe abtransportiert wird. Aufgrund der Bedingungen in der PBA wird das Eisen in Form von Eisenhydroxid ( $\text{Fe}(\text{OH})_3$ ) ausgeflockt. *Abbildung 29* zeigt die Auswirkungen des Belages auf. Hierbei wird eine gleichmäßige Verteilung und Absetzung der Schwebeteilchen im Becken vorausgesetzt.



**Abbildung 29** Auswirkungen des Belages

Um das Volumen des Belages auf *Chara vulgaris* berechnen zu können, wird die Oberfläche **OF** und die Menge der Ablagerungen pro Tag benötigt. So wird im Modellkonzept PBA (Abbildung 30) die Durchflussmenge des Wassers mit 50% der einkommenden Eisenkonzentration multipliziert (**EisenVerwendung aus Wasser**). Unter den gegebenen Wasserbedingungen (**WIS**) der PBA beläuft sich die Menge an abgesetztem Eisen in allen Becken (3A/B und 4A/B) täglich auf 88g (**Gesamt Eisen**). Aus der Division des Eisengehaltes im Wasser durch die bekannte Beckengröße ( $794m^2$ ) und der Multiplikation mit **HilfZeitEisen** lässt sich die Ablagerung des Eisens errechnen (siehe Abbildung 30; **Ablagerung Eisen**). Hierfür beträgt die Sedimentation pro Tag  $1,108 * 10^{(-7)}mm$  auf *Chara vulgaris*. Das stellt die Schichtdicke **SD** dar. Für die Berechnung der **OF** gilt:

$$1kg \text{ BM} \triangleq 0,09m^2 \text{ OF}$$

$$1g \text{ Ablagerung Eisen pro Tag} \triangleq 1,108 * 10^{-7}mm$$

So ergibt sich das Volumen (in  $m^3$ ) des Belages durch Multiplikation der **OF** mit der Schichtdicke (**VolumenEisen**). Die **OF** steht hierbei in engem Kontakt mit der Biomasseentwicklung. Damit entsteht eine Abhängigkeit zwischen Volumen und Wachstum.

**Tabelle 16** Wachstumsbewertung in Bezug auf die Belagdicke

| Schichtdicke<br>Eisen in mm | Bewertung | Schichtdicke<br>Eisen in mm | Bewertung | Schichtdicke<br>Eisen in mm | Bewertung |
|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|-----------------------------|-----------|
| 0                           | 1         | 0,007                       | 0,65      | 0,014                       | 0,3       |
| 0,001                       | 0,95      | 0,008                       | 0,6       | 0,015                       | 0,25      |
| 0,002                       | 0,9       | 0,009                       | 0,55      | 0,016                       | 0,2       |
| 0,003                       | 0,85      | 0,01                        | 0,5       | 0,017                       | 0,15      |
| 0,004                       | 0,8       | 0,011                       | 0,45      | 0,018                       | 0,1       |
| 0,005                       | 0,75      | 0,012                       | 0,4       | 0,019                       | 0,05      |
| 0,006                       | 0,7       | 0,013                       | 0,35      | 0,02                        | 0         |

Die Bewertung erfolgt nur in der exponentiellen und in der stationären Phase der Biomasseentwicklung, da für diese Stadien die Lichtabschwächung relevant ist.



Da eine nachgewiesene Beziehung zwischen dem Einfluss des Belages und der Fotosyntheseleistung besteht, wird die Annahme der Abschätzung (**Bewertung Belag**) mit der **gesamten Lichtabschwächung** kombiniert.

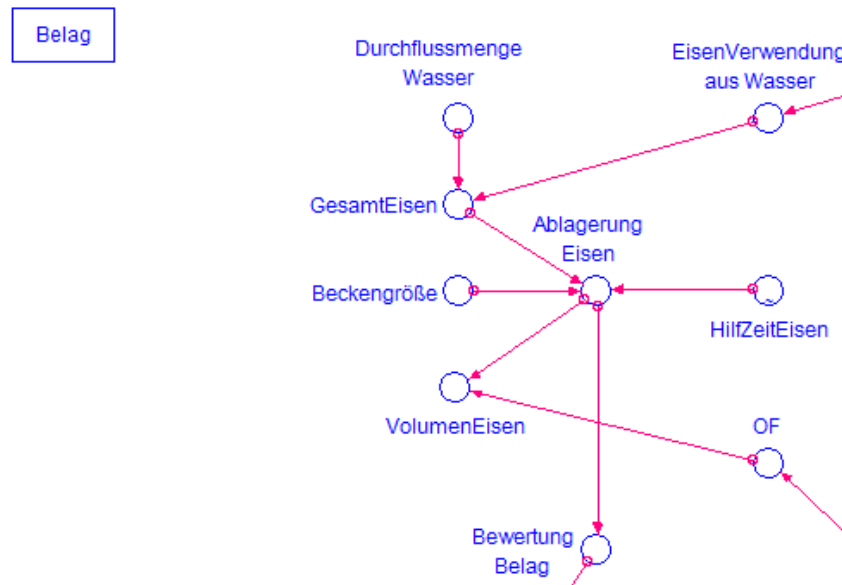


Abbildung 30 Darstellung des Belages in iThink®

#### iv) Biomasseentwicklung und Schadstoffeinbau von *Chara vulgaris*

Hinsichtlich der Entwicklung der Biomasse wurden keine Veränderungen im Vergleich zum Modellkonzept mit optimalen Bedingungen vorgenommen. Auch der Schadstoffeinbau in die Biomasse arbeitet im Modellkonzept PBA äquivalent zum Modellkonzept AZA. Hierbei wurden allerdings unterschiedliche Werte für die Schadstoffkonzentrationen eingebaut, die speziell für *Characeae* unter Belageinfluss beprobt wurden.

Tabelle 17 Vergleich der Stoffkonzentration in der Trockenmasse von *Chara vulgaris* in Bezug auf die AZA und PBA

| Parameter    | Stoffkonzentration in der Trockenmasse (AZA) |       | Stoffkonzentration in der Trockenmasse (PBA) |       |
|--------------|--|-------|--|-------|
| $Na^{+}$     | 380  | mg/kg | 475  | mg/kg |
| $K^{+}$      | 4140   | mg/kg | 1518   | mg/kg |
| $Mg^{2+}$    | 3565   | mg/kg | 4527   | mg/kg |
| $Ca^{2+}$    | 256000                                       | mg/kg | 290429                                       | mg/kg |
| $Fe^{2+/3+}$ | 2055   | mg/kg | 7826   | mg/kg |
| $Mn^{2+}$    | 1700   | mg/kg | 5167   | mg/kg |
| $^{226}Ra$   | 525  | Bq/kg | 17343  | Bq/kg |

## 3.2 Ergebnis der Modellierung

### 3.2.1 Allgemeines

Die Simulation der Wachstumsdynamik und der Schadstoffaufnahme von *Chara vulgaris* unter optimalen und extremen Bedingungen wurde mit Hilfe des erstellten Modellkonzeptes durchgeführt. Um die Unübersichtlichkeit zu vermeiden, die durch die direkte Veränderung der einzelnen Parameter (Converter) im Modell hervorgerufen werden würde, wurde eine Oberfläche (Interface) geschaffen. So können geeignete Elemente effektiv und mit Leichtigkeit verändert und geprüft werden. In *Abbildung 31* ist dieser Sachverhalt dargestellt. Hierbei konzentriert sich die Prüfung (in zwei Testlisten dargestellt) auf drei Bereiche.

1. Wasserinhaltsstoffe (WIS)
2. Fotosyntheseparameter mit der Auswahl der Strahlung
3. sonstige Testvariablen

The screenshot shows the software interface for modeling *Chara vulgaris* growth and pollutant uptake. The interface is titled "Modellierung der Wachstumsdynamik und Schadstoffaufnahme von *Chara vulgaris* unter optimalen Bedingungen (AZA) TEST". It features two main input tables:

| Wasserinhaltsstoffe   |      |
|-----------------------|------|
| WIS Wasser[Natrium]   | 11,3 |
| WIS Wasser[Kalium]    | 1,6  |
| WIS Wasser[Magnesium] | 7,8  |
| WIS Wasser[Calcium]   | 33,4 |
| WIS Wasser[Eisen]     | 0,06 |
| WIS Wasser[Mangan]    | 0,05 |
| WIS Wasser[Ammonium]  | 0,1  |
| WIS Wasser[Chlor]     | 2,3  |

| TestVariablen       |      |
|---------------------|------|
| SF                  | 0,03 |
| Max BM              | 1000 |
| Pflanzenhöhe pro kg | 0,3  |
| WG                  | 0,15 |
| Wasserstand         | 1    |
|                     |      |
|                     |      |
|                     |      |

**Abbildung 31** Darstellung der Ergebnisprüfung (optimale Bedingungen)

Unterhalb der Testlisten können die Ergebnisse gegebenenfalls visualisiert werden. Das erfolgt über Diagramme und Tabellen; aber auch Warnleuchten oder numerische Ausgaben der Ergebnisse sind möglich.

Die einzelnen Testvariablen werden durch das Einfügen aus dem Modell in die Liste direkt aufgenommen. Hierbei wird ein Bereich vom Benutzer selbst definiert, in dem die veränderliche Größe schwanken soll. Im eigentlichen Modellkonzept erscheint dabei ein Listensymbol. Auch eine Veränderung des Variablennamens kann über das Interface mit einer automatischen Namensänderung im Modell durchgeführt werden.

Die Ergebnisdiskussion wird durch die Änderung der jeweiligen Werte organisiert. Hierbei sollen vor allem bestimmte Grenzbereiche mit einer Prüfung der Ergebnisse durch Literaturangaben und Erkennen logischer Zusammenhänge aufgezeigt werden.

### 3.2.2 Ergebnisdiskussion des Modellkonzeptes AZA

Die Ergebnisdiskussion unter optimalen Bedingungen konzentriert sich zunächst auf die WIS im Modellkonzept. Wie schon durch die Datenbank des LfULG Sachsens vermutet, bedeutet ein autochthoner Standort nicht unbedingt optimale Bedingungen für *Chara vulgaris*. So sind auch die Basiswerte für die AZA nicht absolut vollkommen. Auf der Grundlage der Annahmen hinsichtlich der Abstufungsbewertung (*Abschnitt 3.1.2 - i*) werden die WIS des Seigenwassers in der AZA differenziert.

Der *gewichtete WF* wird durch die Ergebnisprüfung der verschiedenen WIS zunächst unter den gegebenen Bedingungen in der AZA dargestellt. Hier ist ein Wachstum von 96% zu erwarten (*Abbildung 32*). Aber warum weist das Seigenwasser kein hundertprozentiges Wachstum auf? Die Ursachen sind die Ionen Chlorid und Nitrat, die den Toleranzbereich in einem bestimmten Maß unterschreiten. Die Kontrolle der Abweichung (in *Excel*<sup>®</sup>) vermerkt  $Cl^- = -11,54\%$  und  $NO_3^- = -52,38\%$  Unterschreitung. Aufgrund der Bewertung haben diese Prozente eine Abstufung von  $Cl^- = 2$  (80% Wachstum) und  $NO_3^- = 3$  (70% Wachstum) zur Folge. Der Durchschnittswert aus vierzehn Elementen (zwölf Elemente haben 100% Wachstum) notiert so 96,43% Wachstum.

|                |      |
|----------------|------|
| gewichteter WF | 0,96 |
|----------------|------|

**Abbildung 32** Gewichteter WF (originale WIS der AZA)

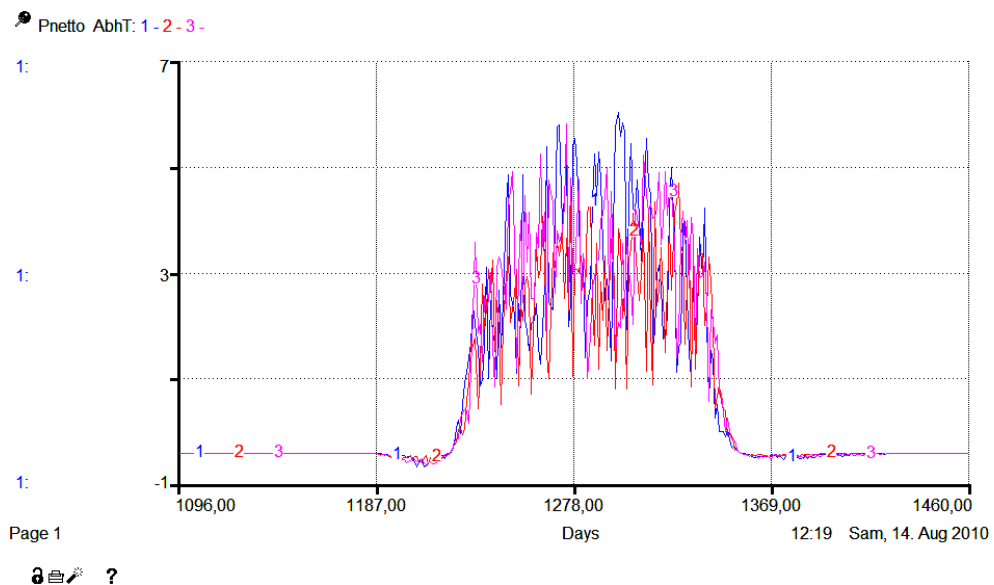
Nun wird ein Element der WIS so verändert, dass dieses enorm vom Toleranzbereich abweicht. Es ist dann keine Entwicklung der Biomasse mehr erwarten. Welche Stoffe der WIS eignen sich dafür am besten? Dies trifft für Bicarbonat  $HCO_3^-$  und Sauerstoff  $O_2$  zu. Aber auch andere Stoffe haben drastische Auswirkungen auf die Entwicklung von *Chara vulgaris* (siehe Abstufungsbewertung). *Abbildung 33* zeigt den gewichteten WF bei enormer  $HCO_3^-$  - Reduzierung (im Wasser sind noch  $40 \frac{mg}{l}$  enthalten) auf. So steht in der Bewertung eine Einhundert, sodass die Entwicklung der Biomasse aussetzt (Stock *BM* bleibt auf Null).

|                |      |
|----------------|------|
| gewichteter WF | 0,00 |
|----------------|------|

**Abbildung 33** Gewichteter WF (enorme Reduzierung von  $HCO_3^-$ )

Neben den WIS gibt es auch Fotosyntheseparameter, die einer Ergebnisdiskussion unterzogen werden müssen. Zunächst wird sich auf den Schalter für Auswahl des jeweiligen Jahres konzentriert. Der Auswahlbereich liegt zwischen eins und vier. Hier besteht die Möglichkeit, ein Normaljahr (*NOJ* 1994), Nassjahr (*NAJ* 2002), Trockenjahr

(*TJ* 2003) oder ein ideales Jahr (*Walsby*) auszuwählen. Die vier Jahre lassen sich hinsichtlich ihrer Globalstrahlung unterscheiden (*Abschnitt 3.1.2 – iv*). Das *NAJ* 2002 weist beispielsweise an einigen Tagen eine deutlich geringere umgerechnete Photonenstrahlung auf als im *NOJ* 1994. So lässt sich vermuten, dass die Fotosyntheseleistung etwas geringer ist. Da das Jahr 2003 als *TJ* definiert wurde, sollten hier die Werte für die Nettofotosynthese höher sein, weil die Globalstrahlung höher sein müsste. Natürlich spielen auch andere Parameter eine wichtige Rolle, wie etwa die Niederschlagsmenge oder die Bewölkung.

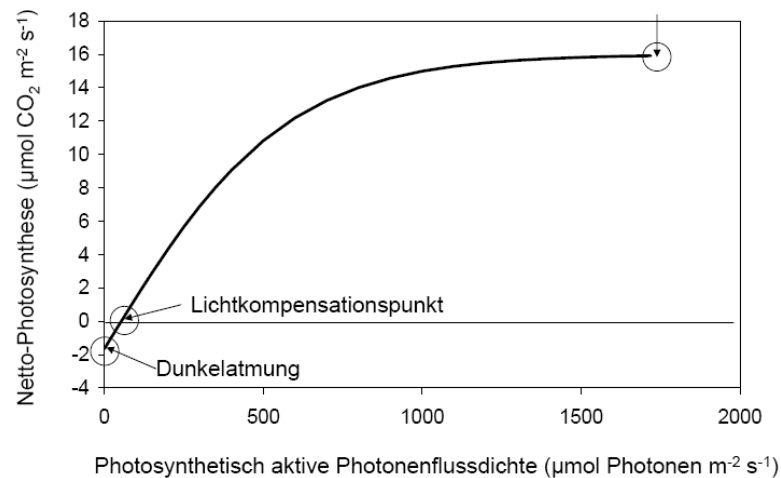


**Abbildung 34** Nettofotosynthese der vierten Vegetationsperiode (1 PAR NOJ, 2 PAR NAJ, 3 PAR TJ)

In *Abbildung 34* werden die Unterschiede der verschiedenen PAR-Strahlungen sichtbar. Das *NOJ* (blaue Linie) und *TJ* (rosa Linie) zeigen dabei die höchsten Werte für die Nettofotosynthese auf. Die Vermutung bewahrheitet sich, dass die Nettoleistung des *NAJes* am geringsten ausfällt. Die Fotosynthese richtet sich hierbei nach dem Biomassewachstum bzw. der Höhe der *Chara vulgaris*-Pflanze. Je höher *Chara vulgaris* ist, umso mehr Fotosyntheseleistung kann diese erbringen. Die höchste Nettoproduktion liegt bei etwa  $5,34 \frac{\text{mol } O_2}{\text{m}^2}$  (blaue Linie (NOJ) Tag 203).

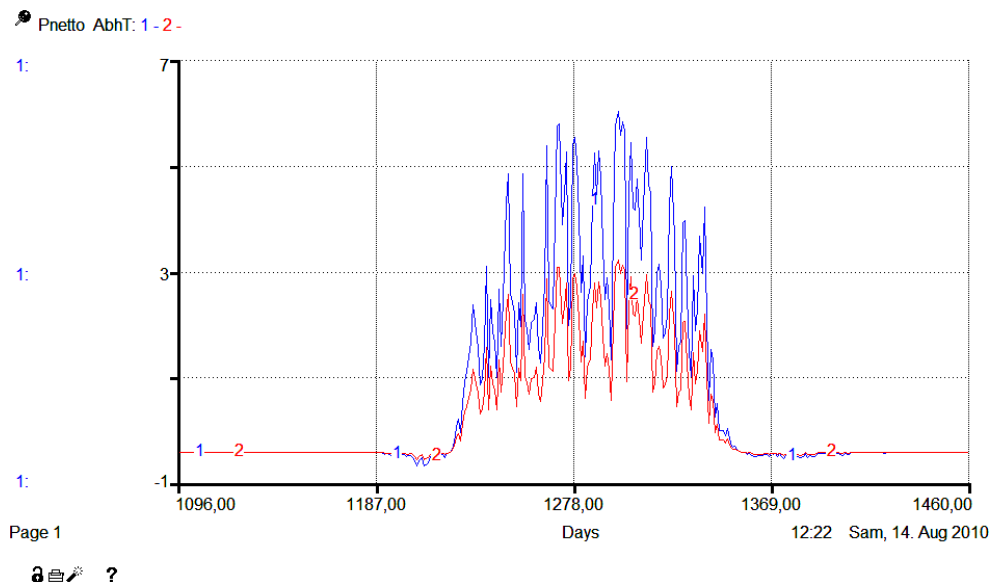
In *Abbildung 34* gibt es Bereiche, in denen die Werte der Primärproduktion negativ oder positiv sind. Was bedeuten diese Nettofotosyntheseergebnisse? Die Ergebnisse verdeutlichen die Produktion von  $\frac{\text{mol } O_2}{\text{m}^2}$  pro Tag. Hier veranschaulichen negative Nettofotosyntheseleistungen einen Dissimilationsprozess (Atmung) und positive Fotosyntheseleistungen einen Assimilationsprozess (Fotosynthese). *Abbildung 35* zeigt diesen Sachverhalt in Abhängigkeit von der PAR-Strahlung. Der

Lichtkompensationspunkt definiert das Gleichgewicht zwischen Dissimilation und Assimilation.



**Abbildung 35** Darstellung der Assimilation und der Dissimilation in Abhängigkeit von der Strahlung

Nun werden die Ergebnisse hinsichtlich Lichtstandort und Schattenstandort geprüft. Hierbei wird sich auf die PAR-Strahlung des *NOJes* bezogen. Wie in *Abbildung 36* dargestellt, sind die Werte für die Nettofotosyntheseleistung des Lichtstandortes (rot) von *Chara vulgaris* deutlich geringer als diejenigen am Schattenstandort (blau) (basierend auf den Daten von (Schubert & Marquardt, 2007) –  $P_{max}$ ,  $R$ ,  $\alpha$  und  $Chl a$ ).

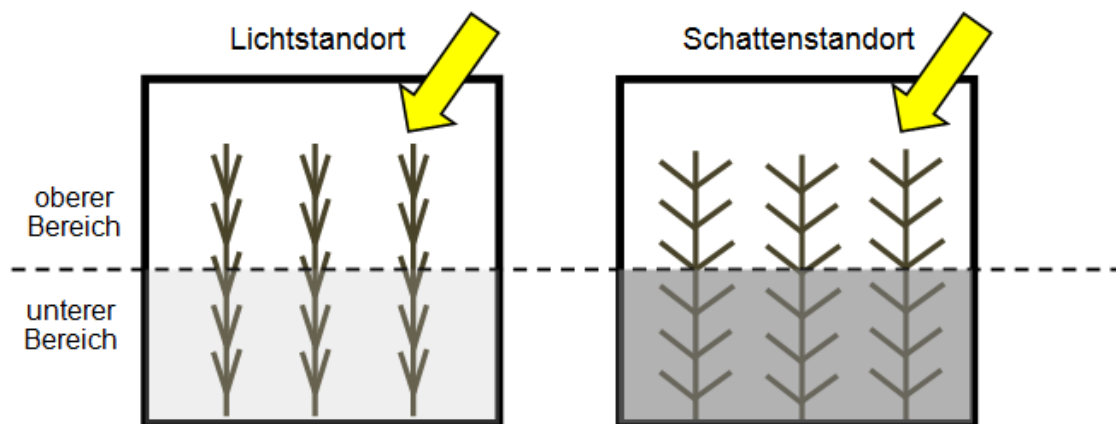


**Abbildung 36** Vergleich Schattenstandort [1] und Lichtstandort [2] innerhalb der vierten Vegetationsperiode

Begründet wird das Ergebnis in *Abbildung 36* durch die Untersuchung von *Schneider et al.*, bei der *Characeae* einen Mechanismus der wachstumsbasierten Orientierung zum Licht haben. Wenn viel Licht vorhanden ist (Lichtstandort), nimmt der *Chl a*-Gehalt ab, wenn weniger Strahlung verfügbar ist, nimmt der *Chl a*-Gehalt zu (Schneider,

Ziegler, & Melzer, 2006). Das spiegelt sich auch in der Orientierung der Zweige bezüglich der Sprossachse wider.

Um den Sachverhalt besser erklären zu können, wird an *Chara vulgaris* eine Vereinfachung vorgenommen. In *Abbildung 37* werden zwei Bereiche definiert: ein oberer und ein unterer Bereich. Ersterer erhält hierbei die größte Lichtintensität. Ausschließlich die Zweigorientierung, die aus dem Standort resultiert, beeinflusst die Menge der ankommenden Strahlung. Der untere Bereich profitiert am Lichtstandort durch verringerten Schattenwurf der darüber liegenden Zweige von mehr Licht. Er trägt zur Fotosyntheseleistung bei. Am Schattenstandort jedoch arbeitet der obere Bereich mit größerer Auslastung; der untere Bereich trägt weniger zur Fotosynthese bei (Beschattung und Standortvoraussetzung). Die Summe der Primärproduktionen des oberen und des unteren Bereiches ist höchstwahrscheinlich durch größere Lichtdurchlässigkeit in die untere Schicht aufgrund der Orientierung der Zweige (Schutzmechanismus) am Lichtstandort höher. Der Nachteil durch die konvergent verlaufende Zweigorientierung wird ausgeglichen. So wird in der Natur die Primärproduktion des Schattenstandortes vom Lichtstandort trotz Schutzmaßnahmen übertroffen oder verhält sich gleichwertig.

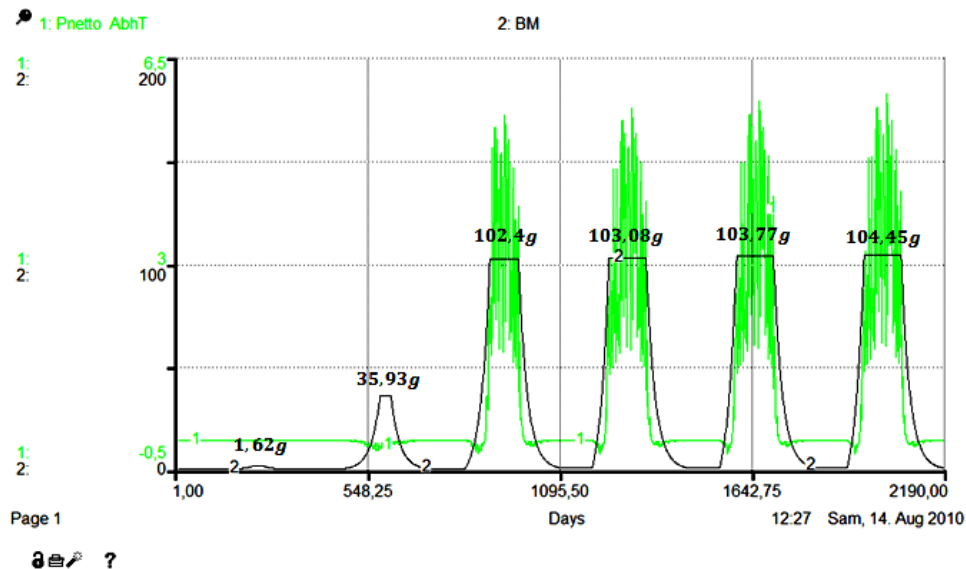


**Abbildung 37** Zweigorientierung bei verschiedenen Lichtverhältnissen

Das Ergebnis vom Modellkonzept AZA entspricht somit nicht der Realität, da keine Differenzierung eines oberen und eines unteren Pflanzenbereiches berücksichtigt wird. Zur Berechnung der spezifischen Nettofotosynthese des jeweiligen Standortes werden lediglich die Werte von  $P_{max}$ ,  $\alpha$ ,  $R$  und  $Chl\ a$  herangezogen. Die Beschattung durch andere Pflanzenteile und die Zweigorientierung werden im Modellkonzept ausgeschlossen bzw. vernachlässigt.

In den *Abbildung 34* und *Abbildung 36* wurde die Darstellung auf die dritte Vegetationsperiode beschränkt, damit die Auswirkung des jeweiligen zu

untersuchenden Problems besser beleuchtet werden kann. In *Abbildung 38* erfolgt die Illustration der Nettofotosyntheseleistung in Bezug auf sechs Jahre. Hierbei werden die Globalstrahlung eines Normaljahres sowie die Fotosyntheseparameter am Schattenstandort verwendet. Bei näherer Betrachtung stellt sich die Frage: Warum variieren die maximalen Primärproduktionsergebnisse innerhalb der ersten drei Vegetationsperioden so stark und verlaufen anschließend nahezu ähnlich?



**Abbildung 38** Darstellung der Nettofotosyntheseleistung und der Biomasseentwicklung am Schattenstandort über sechs Vegetationsperioden

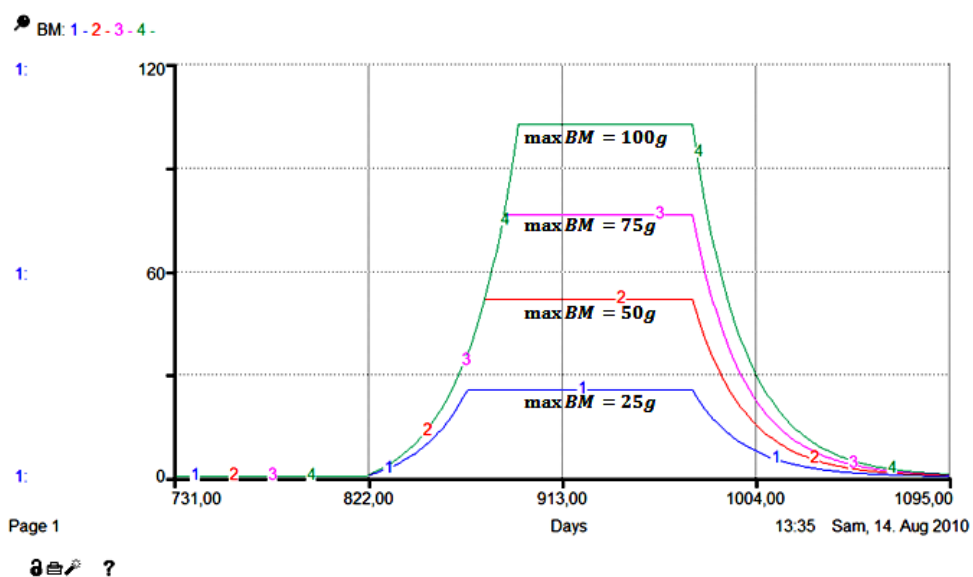
Die Begründung liegt in der Definition des Zuwachses. Der Sachverhalt wird mit Hilfe der Biomasseentwicklung (vgl. *Abbildung 38*) präsentiert.

Der *Zuwachs* ist so definiert, dass er im ersten Jahr bei der Oospore beginnt und in den darauffolgenden Jahren bei der Biomasse des Vorjahres. Um die Entwicklung von *Chara vulgaris* realistisch darzustellen, wird von einer Oosporenmasse von 0,1605mg ausgegangen. In der Literatur wird beschrieben, dass eine gewisse Anlaufphase benötigt wird, bevor die Alge wirklich mit dem Wachstum beginnt. So ist die exponentielle Phase aufgrund des Wachstumsbeginns mit einer Oospore im ersten Jahr etwas länger definiert als in den Folgejahren. Doch wie in *Abbildung 38* gezeigt, spiegelt sich diese Definition kaum in den Ergebnissen wider. Das Wachstum aus einer Oospore innerhalb der ersten Vegetationsperiode benötigt viel Zeit und Geduld, bevor überhaupt eine Biomasseentwicklung gesichtet werden kann. Die Masse während der Stagnationsphase beläuft sich auf 1,62g. Hierfür ist die längere exponentielle Phase von Vorteil, da die Oospore mehr Zeit ihrer Etablierung hat. In der Literatur wird dieser Sachverhalt bestätigt. Die Algenentwicklung aus einer Oospore erfolgt zwar mit einer direkten Anpassung an die gegebenen abiotischen Bedingungen, jedoch braucht diese mindestens eine Vegetationsperiode, bevor eine Biomasseentwicklung verzeichnet

werden kann und ihre volle Wachstumsgröße erreicht (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2007). Das ist im Modellkonzept AZA erst von der dritten Vegetationsperiode an der Fall. So entwickelt sich die Biomasse immer aus der noch stehenden und lebenden Biomasse des Vorjahres. Je mehr Algensubstanz verbleibt, desto schneller erreicht *Chara vulgaris* die Stagnationsphase und desto kürzer verläuft eine exponentielle Phase (basierend auf der Grundlage der Definition von *Max BM*). So beträgt die Dauer der Wachstumsphase, beispielsweise in der dritten Vegetationsperiode, ca. 71 Tage und im darauffolgendem Jahr nur noch ca. 41 Tage.

Die Primrproduktionsleistungen sind in Abhängigkeit von der Biomasseentwicklung in die Modellkonzepte eingefügt worden. Folglich übertreten die Fotosyntheseleistungen der einzelnen Vegetationsperioden erst bei einem bestimmten berschreiten einer Algenmasse die Nulllinie im Diagramm (*Abbildung 38*). In den ersten zwei Jahren ist die Leistung negativ. Anschließend erreichen sie Werte von bis zu  $6 \frac{\text{mol O}_2}{\text{m}^2}$ .

In *Abbildung 38* wird ersichtlich, dass die Biomasseproduktion mit dem Erreichen einer Grenze (*Max BM*) „abgebrochen“ wird. Um das Eintreten der Stagnationsphase überprüfen zu können, wird *Abbildung 39* aufgeführt.



**Abbildung 39** Biomasseentwicklung in Abhängigkeit der Max BM innerhalb der dritten Vegetationsperiode

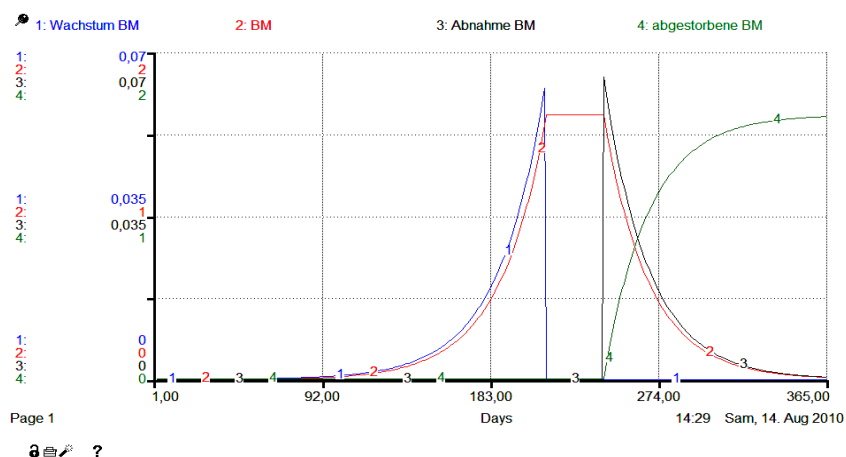
In *Abbildung 39* wird die Biomasseentwicklung in Abhängigkeit von den einzelnen Werten in *Max BM* dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass die stationäre Phase mit Zunahme der Zahlen in *Max BM* auf der Zeitachse nach hinten verschoben wird. Die zeitliche Länge verkürzt sich somit aufgrund der verzögerten Einleitung des konstanten Bereiches. Auch die Länge der exponentiellen Phase ändert sich. Warum ist der Anstieg des Zuwachsbereiches der blauen Kurve nicht gleichzusetzen mit den



anderen? Die Lösung ergibt sich aus der vorherigen zweiten Vegetationsperiode. Dort wird die Biomasseproduktion beim Erreichen der 25g ebenfalls abgebrochen. So ist die Ausgangsbiomasse geringer, und das Wachstum erfolgt mit einem geringen Anstieg der exponentiellen Phase. Durch die Definition der Abklingphase (siehe *HilfEinteilungJahr*) beginnt diese immer zum gleichen Zeitpunkt (hier am Tag 974). So ergibt sich für sechs Vegetationsperioden im Modellkonzept folgende Aussage: Je größer der Grenzwert für *Max BM* gewählt wird, desto mehr Biomasse kann im Vorjahr gebildet werden. So vergrößert sich auch die stehende Ausgangsbiomasse für eine erneute exponentielle Phase, und die Algenentwicklung kann mit dem Übergang in eine stationäre Phase schneller abgeschlossen werden.

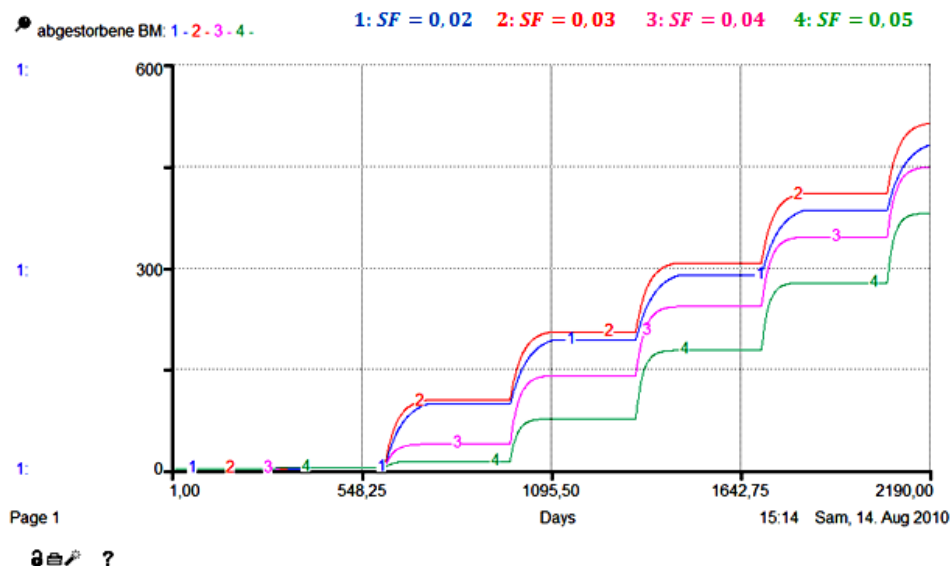
Biologisch kommt diese Art der Definition der stationären Phase aufgrund des Vorkommens ganzer Pflanzenbestände und nicht einer einzelnen Pflanze in der Natur nicht vor. Die Pflanzen beeinflussen sich gegenseitig (Schatten, Konkurrenz, etc.), sodass irgendwann eine Grenze des Wachstums erreicht ist. In der Natur ist es unwahrscheinlich, dass sich die stationäre Phase nach dem Erreichen einer bestimmten Biomasse richtet. Andere Einflussfaktoren spielen hierfür eine größere Rolle, wie etwa die Wasserhöhe. Aus der Literatur ist bekannt, dass *Chara vulgaris* eine maximale Wuchshöhe von 30cm erreichen kann (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2008). So wird sich im Modellkonzept auf diese Definition der stationären Phase bezogen.

Die Biomasseproduktion wird über den Grad des Wachstums und der Sterbephase von *Chara vulgaris* definiert. Die absterbende Substanz wird anschließend aufgefangen (*Abbildung 40*). Die Zunahme sowie die Abnahme der Biomasse im Stock *BM* definieren sich hierbei genau durch den jeweiligen Kurvenverlauf von Zu- (blau) und Abfluss (schwarz). Es muss darauf geachtet werden, dass in der Abbildung unterschiedliche Achseneinteilungen verwendet wurden.



**Abbildung 40** Darstellung des Bereiches der gebildeten Biomasse während der ersten Vegetationsperiode

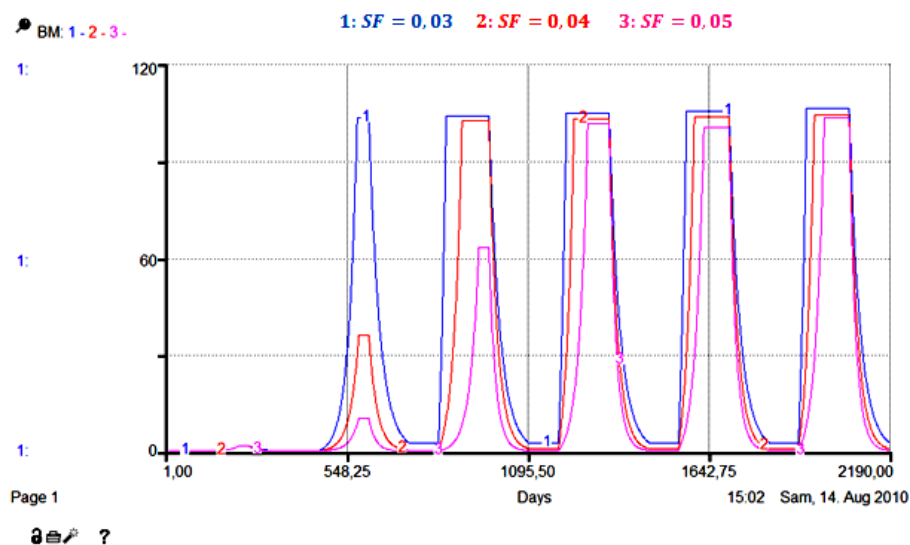
Solange, durch die zeitliche Definition der Abklingphase, Biomasse abstirbt (vgl. *Abbildung 23*), wird der Stock „abgestorbene BM“ „gefüllt“. Ansonsten ist die Biomassezunahme der toten Substanz konstant null. Da in der Illustration die erste Vegetationsperiode gezeigt wird, ist die Biomasseentwicklung geringer als in den nachfolgenden Zyklen. Um die Abhängigkeit des *SF*s mit dazugehörigen Auswirkungen auf den Stock „abgestorbene BM“ zu überprüfen, wurde *Abbildung 41* entwickelt.



**Abbildung 41** Darstellung der abgestorbenen Biomasse in Abhängigkeit von verschiedenen Sterbefaktoren

In *Abbildung 41* werden in Abhängigkeit von den verschiedenen Sterbefaktoren ausschließlich die Steilheit und die Menge der abgestorbenen Biomasse verändert. So wirkt sich ein veränderter *SF* erst mit Zunahme der Jahre merklich aus, indem die „Schäre“ der toten Substanz größer wird. Die Vermutung liegt nahe, dass mit Zunahme des Sterbefaktors auch die abgestorbene Biomasse größer wird. Doch in Wirklichkeit zeigt das Ergebnis eher das Gegenteil auf. In *Abbildung 41* sind vier Sterbefaktoren dargestellt. Ein *SF* von 0,02 und 0,03 zeigt noch geringe Auswirkungen auf die Entwicklung der toten Substanz. Hier ist sogar noch eine Zunahme der abgestorbenen Biomasse im Stock zu verzeichnen (vgl. *Abbildung 23*). Doch wenn der  $SF \geq 0,04$  ist, wird jedes Jahr entsprechend auch weniger lebende Biomasse gebildet, da am Jahresende mehr Substanz abstirbt. So kann weniger tote Algenmasse im letzten Stock aufgefangen werden. Dementsprechend verändert sich das Verhalten der rosafarbenen und der grünen Kurve. Während der ersten Sterbephase kann aufgrund des geringen Absterbens keine Darstellung in *Abbildung 41* erfolgen. Trotzdem können geringe Werte mit bis zu ca. 1,6g beobachtet werden. Die Stufenfunktion entsteht aufgrund der Definition im Abfluss *Abnahme BM* (vgl. *Abbildung 23*).

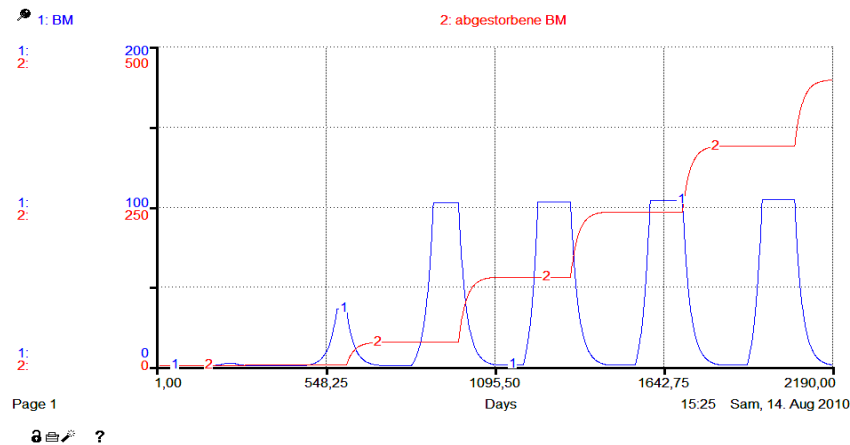
Auswirkungen veränderter Sterbefaktoren werden in der nachfolgenden *Abbildung 42* in Bezug auf die Biomasse gezeigt. Hier muss allerdings hinzugefügt werden, dass ein Wert von 4% Absterben pro Tag realistisch sind. Je größer der Sterbefaktor im System wird, umso mehr Biomasse geht jedes Jahr verloren. So wird die Ausgangsmasse für eine erneute Vegetationsperiode geringer. Die Alge benötigt mehr Zeit, um dieses Defizit auszugleichen. Die maximal erreichbare Biomasse (in Bezug auf sechs Jahre) dauert beispielsweise bei einem Sterbefaktor von 0,05 eine Vegetationsperiode länger als bei einem Sterbefaktor von 0,04. Im Modellkonzept wird sich im nachfolgenden immer auf einen Sterbefaktor von 0,04 bezogen.



**Abbildung 42** Auswirkungen eines veränderten Sterbefaktors auf die Biomasseentwicklung

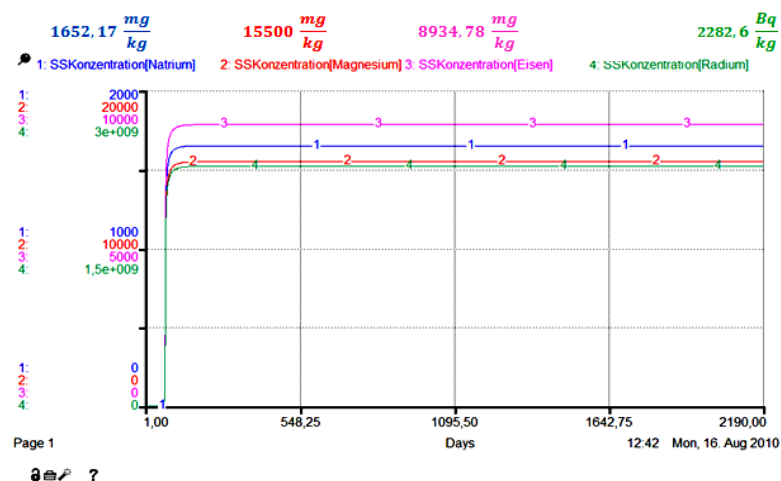
Wie ist biologisch die abgestorbene Biomasse zu erklären? Die tote Biomasse wird an autochthonen Standorten und den Becken der PBA Pöhla meist als Sediment am Boden abgelagert oder liegt in gelöster Form im Wasser vor. Natürlicherweise erfolgt eine Zersetzung durch Organismen. Die Organik wird hierbei wieder zurückgelöst. Ausschließlich die Anorganik wird als Sediment am Boden abgesetzt.

Den Zusammenhang zwischen abgestorbener Substanz und gebildeter Biomasse eines Jahres zeigt *Abbildung 43*. Hier wird der Zusammenhang zwischen dem Einsetzen der Aufnahme toter Substanz (im Stock *abgestorbener BM*) mit dem Eintreten der Abklingphase eines jeden Jahres dargestellt. Wenn sich die Biomasseentwicklung in der Winterpause, der exponentiellen Phase oder der Stagnationsphase befindet, erfolgt kein Absterben von Biomasse.



**Abbildung 43** Darstellung der abgestorbenen Biomasse im Vergleich zu der gebildeten Biomasse im Zeitraum von drei Jahren

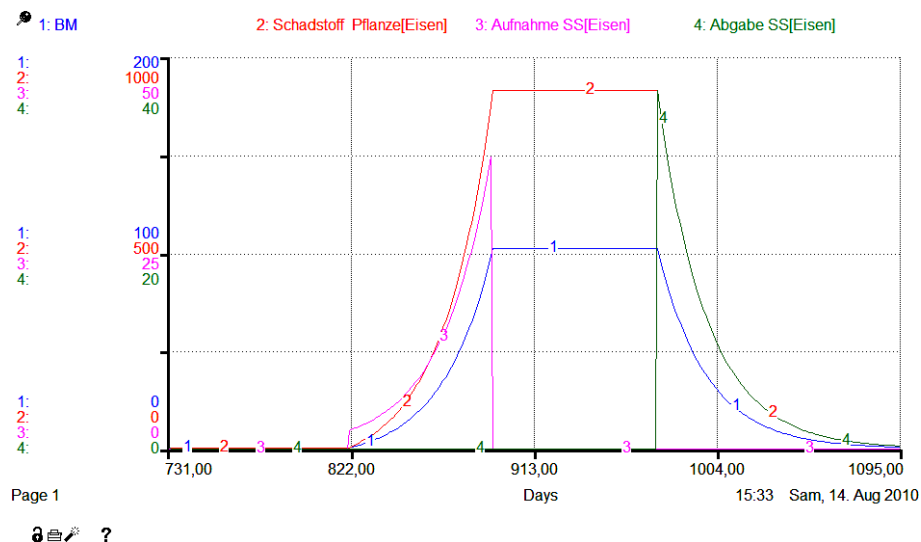
Aber nicht nur die Biomasseentwicklung des Modellkonzeptes AZA spielt eine wichtige Rolle, sondern auch die Schadstoffaufnahme von *Chara vulgaris*. Hierbei wurde die Biomasseeinlagerungskonzentration einer Beprobung als Basiswert für die Schadstoffaufnahme verwendet (Vektor *SSEinbau* – vgl. *Abbildung 25*). Es bestünde auch die Möglichkeit einer Kopplung des Schadstoffeinkbaus mit den Eingangsparametern des Wassers. Folglich würden Konzentrationsänderungen der einzelnen WIS-Elemente ebenso Veränderungen in den einzubauenden Schadstoffkonzentrationen hervorrufen. Dies konnte aber im Modellkonzept nicht verwirklicht werden, weil sich die einzelnen Komponenten des Wassers im Laufe einer Vegetationsperiode so stark verändern, dass zwischen beiden keine Beziehung erkannt oder hergestellt werden konnte. So fließt von dem Vektor *SSEinbau* eine Konzentration in das Modell ein; diese bleibt zu jedem Zeitpunkt gleich. In *Abbildung 44* wird die Schadstoffkonzentration ausgewählter Verbindungen dargestellt. Hierbei sind die maximal erreichbaren Konzentrationen über deren angegeben. Besonders muss aber auf die Achseneinteilung geachtet werden.



**Abbildung 44** Darstellung der Schadstoffkonzentration ausgewählter Elemente (Na, Mg, Fe und  $^{226}\text{Ra}$ )

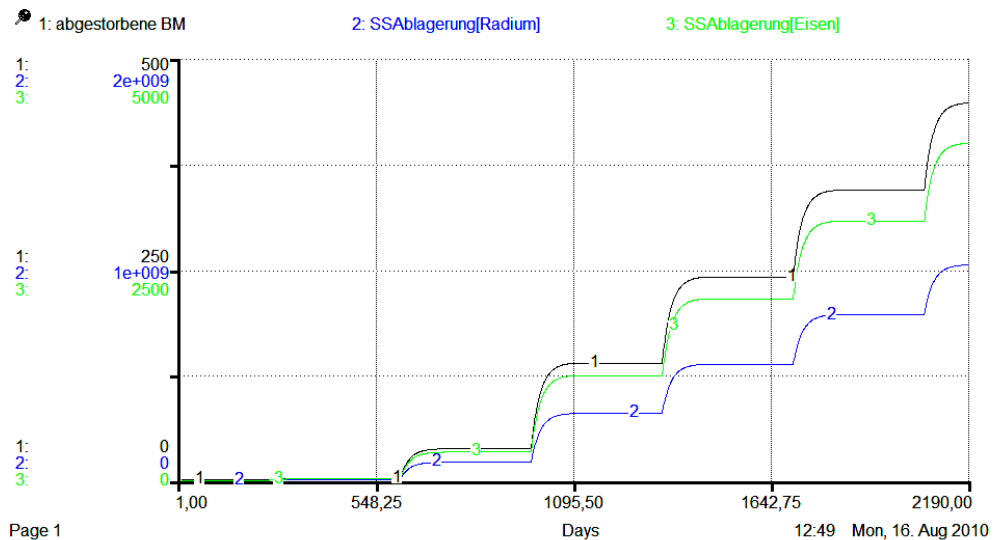
In *Abbildung 44* wird aufgrund der Kopplung der Schadstoffeinlagerung mit der Biomasseentwicklung besonders die Anlaufphase der jeweiligen Schadstoffkonzentration gezeigt. Hierbei wird in der Biomasse erst nach ca. 206 Tagen ein konstanter Wert erreicht. Dieser bleibt anschließend über die gesamte Simulationszeit unverändert.

In *Abbildung 45* wird das Element Eisen in Bezug auf die Biomasseproduktion, die Schadstoffeinlagerung in der Pflanze und ihre Schadstoffaufnahme und -abgabe näher betrachtet. Deutlich sind die zeitliche Einteilung und der Kurvenverlauf der Biomasse und des Schadstoffs in der Pflanze zu erkennen. Beispielsweise beginnen und enden die Stagnationsphasen exakt zu dem gleichen Zeitpunkt. Im Prinzip stellt die grafische Darstellung keine großen Unterschiede zu *Abbildung 40* dar. Lediglich die Abschätzung der y-Achse hinsichtlich der Schadstoffelemente wurde variiert.



**Abbildung 45** Darstellung des Schadstoffeinbaus in *Chara vulgaris* und der Biomasseproduktion in Bezug auf Eisen am optimalen Standort während der dritten Vegetationsperiode

Wie auch bei der Biomasseproduktion mit dem anschließenden Auffang (Stock *abgestorbene BM* – vgl. *Abbildung 23*) werden die Schadstoffe während der Abklingphase in dem darauffolgenden Stock „*SSAblagerung*“ gespeichert (vgl. *Abbildung 25*). Hierbei verhält sich die Abgabe äquivalent zu derjenigen in der abgestorbenen Biomasse, sodass die Schadstoffe im Modellkonzept zusammen mit der Biomasse sedimentieren. In *Abbildung 46* wird dieser Sachverhalt im Vergleich zu der abgestorbenen Biomasse und den Elementen Eisen und Radium betrachtet.

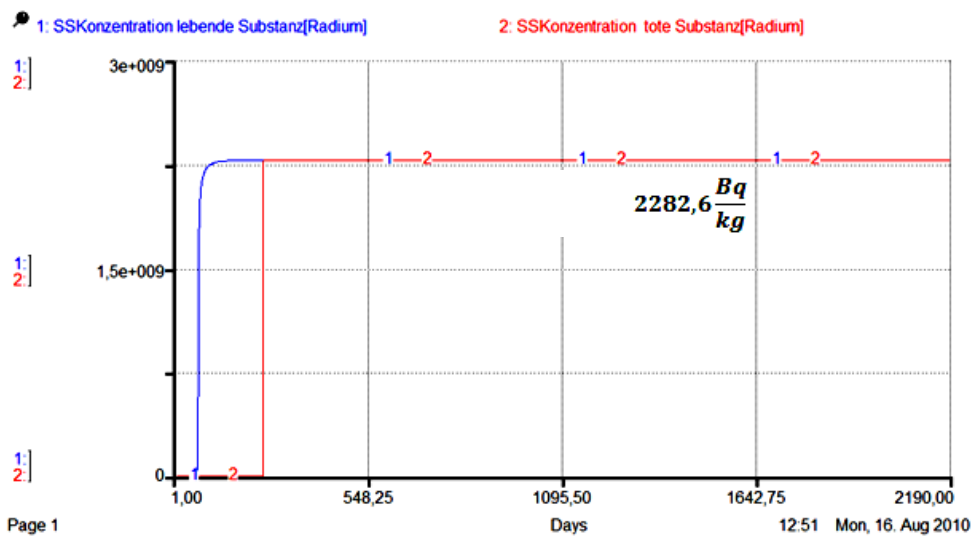


Page 1

?

**Abbildung 46** Vergleich der abgestorbenen Biomasse mit der Schadstoffablagerung, bezogen auf die Elemente  $^{226}\text{Ra}$  und Fe

Die Schadstoffabgabe erfolgt äquivalent zur Biomasseabgabe. Aus diesem Grund verhalten sich die ausgewählten Ablagerungskurven proportional zur absterbenden Biomasse. Die jeweiligen Anstiege eines jeden Jahres ändern sich alle zum gleichen Zeitpunkt. Auch der Grad des Anstiegs ist proportional. Um zu überprüfen, ob auch das Verhältnis zwischen abgestorbener Biomasse und der Schadstoffablagerung richtig ist, wird einerseits die Konzentration zwischen der lebenden Masse und andererseits diejenige der toten Substanz miteinander verglichen. Um eine Division durch null zu vermeiden, wird die Anfangsmasse der abgestorbenen Biomasse auf die einer Oospore definiert. So ergibt sich folgender Vergleich in Bezug auf den Schadstoff  $^{226}\text{Ra}$ , der besonders für das Modell wichtig ist (Abbildung 47).



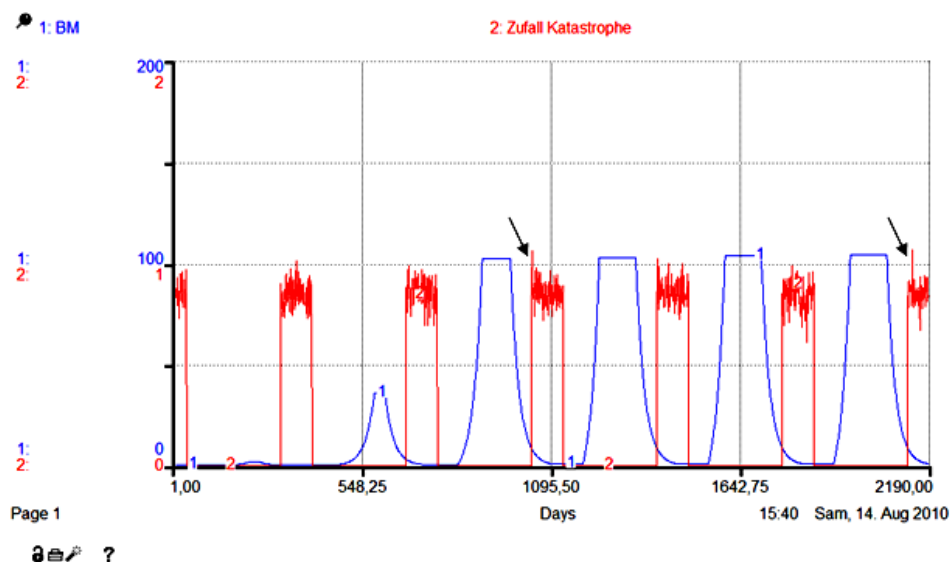
Page 1

?

**Abbildung 47** Vergleich der Schadstoffkonzentrationen der lebenden und toten Substanz

In *Abbildung 47* sind die beiden Konzentrationen identisch. Die Konzentration in der toten Substanz stellt sich erst mit der Abklingphase ein und erreicht allerdings aufgrund des Ausgangswertes in der abgestorbenen Biomasse nie einen konstanten Wert. So wird die Masse einer Oospore bei der Konzentrationsberechnung des jeweils abgelagerten Schadstoffs immer eine Rolle spielen und Veränderungen hinsichtlich der Werte hervorrufen, da sonst keine Konzentrationsberechnung möglich wäre (Division durch Null).

Um auch unvorhersehbare Elemente in das Modellkonzept mit einzufügen, wurde das Eintreten einer Katastrophe, wie etwa extreme Temperaturen während der Winterruhe, modelliert und simuliert. Dies wird auf Grundlage einer Normalverteilung errechnet (*Abbildung 48*). Bei Werten über „eins“ wird die Katastrophe mit hundertprozentigem Absterben ausgelöst. Hierbei ist es „Zufall“, wenn „eins“ erscheint. Ist das der Fall, sollte das Wachstum mit der Masse einer Oospore beginnen und nicht mit derjenigen des Vorjahres. Allerdings ist das derzeit im Modellkonzept noch nicht möglich, da hierfür eine Abhängigkeit von den unterschiedlichen Ausgangsbiomassen und die Länge der exponentiellen Phase separat voneinander eingefügt werden müssen. Die schwarzen Pfeile markieren die Bereiche, in denen ein hundert-prozentiges Absterben in naher Zukunft erfolgen wird. Anschließend stellte die Ausgangsmasse eine Oospore dar.



**Abbildung 48** Darstellung des Zufalls in der AZA (Zeitraum von 3 Jahren)

### 3.2.3 Ergebnisdiskussion des Modellkonzeptes PBA

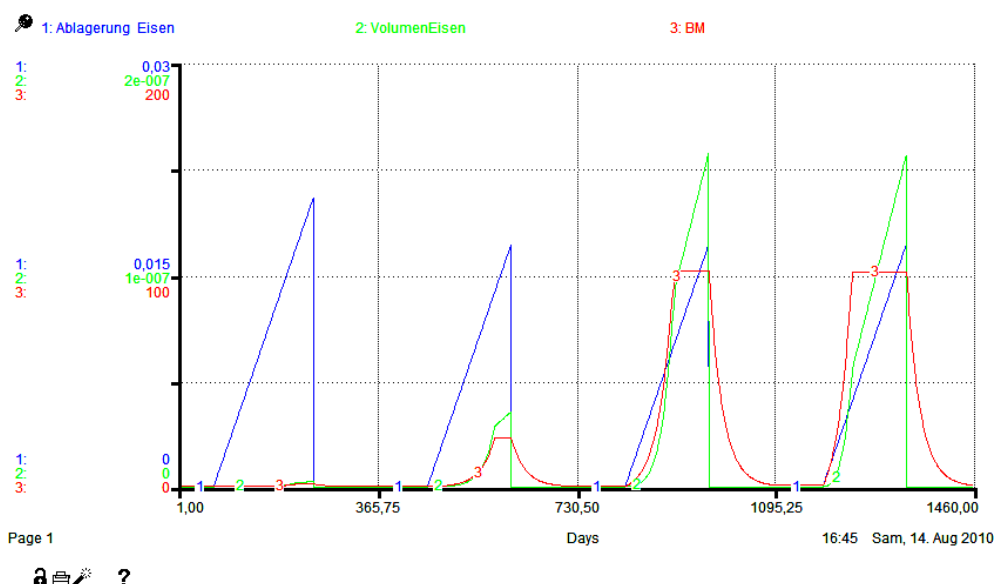
Die Ergebnisdiskussion des Extremstandortes wird nach dem gleichen Prinzip durchgeführt wie unter optimalen Bedingungen. Allgemein werden alle Elemente ausschließlich durch die Wertung des Belages und der WIS beeinflusst, sodass letztlich Auswirkungen auf die Biomasseentwicklung registriert werden können.

Die Bedingungen in der PBA Pöhla sind weniger optimal, als in autochthonen Standorten. Aufgrund der Abstufungsbewertung wird die Entwicklung von *Chara vulgaris*, bezogen auf die gegebenen Wasserbedingungen, in *Abbildung 49* gezeigt. Wird der Wachstumsfaktor des Extremstandortes mit dem der AZA (*Abbildung 32*) verglichen, wird dem Außenstehenden klar, dass sich das Wasser in der PBA Pöhla deutlich negativer auf die Entwicklung von *Chara vulgaris* auswirkt als im Vergleich zu der AZA.

|                |      |
|----------------|------|
| gewichteter WF | 0,86 |
|----------------|------|

**Abbildung 49** Gewichteter WF des Modellkonzeptes PBA

Nicht nur der gewichtete Wachstumsfaktor wirkt sich negativ auf die Entwicklung von *Chara vulgaris* aus, sondern auch der vorhandene Belag. Die abgelagerte Eisenmenge pro Tag beträgt 88g. So lässt sich einerseits in Abhängigkeit der Oberflächenentwicklung das Volumen des Eisenbelages und andererseits die Schichtdicke des Eisens bestimmen (*Abbildung 50*).



**Abbildung 50** Darstellung der Eisenablagerung [mm] und des Eisenvolumens

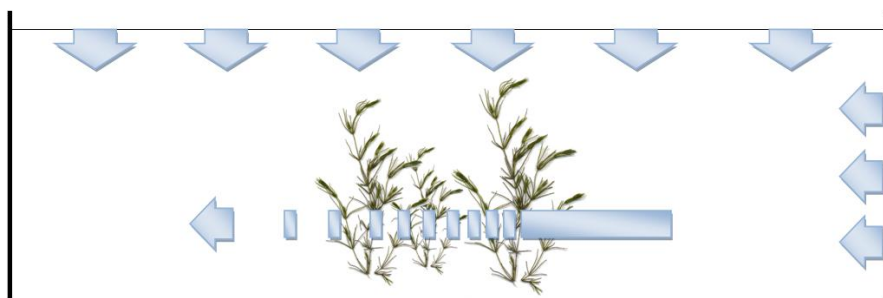
In *Abbildung 50* wird vor allem die Abhängigkeit der Volumenentwicklung mit dem Biomassewachstum gezeigt. Hierbei verhält sich der Wert für die Ablagerung des Eisens (Schichtdicke) zeitlich äquivalent zum Volumen. Beim Erreichen der



Stagnationsphase vergrößert sich dennoch aufgrund der zeitlichen Definition der Länge der Ablagerungsphase das Belagvolumen. Diese beginnt mit der exponentiellen Phase eines jeden Jahres und endet zu Beginn der Abklingphase, bei der sich der Belag nicht mehr vergrößert. Die Entwicklung der Schichtdicke ist aufgrund der Aufteilung der Phasen im ersten Jahr größer als in den Folgejahren. Aufgrund der Biomasseentwicklung vergrößert sich das Volumen des Eisens im ersten Jahr unmerklich. Die Algenmasse zeigt nur geringes Wachstum. Erst im darauffolgenden Jahr weist *Chara vulgaris* eine Masse von 22,99g auf. Entsprechend vergrößert sich auch das Volumen des Eisens.

Doch warum endet die Belagablagerung so abrupt? Während der Sterbephase und der Winterruhe sterben große Mengen an Pflanzenteilen von *Chara vulgaris* ab, sodass davon ausgegangen werden kann, dass hauptsächlich die fotosyntheseaktiven Elemente des Pflanzenbestandes nach der Winterruhe nicht mehr vorhanden sind und diese sich erst wieder entwickeln müssen. So spielt der alte Belag des Vorjahres in der nachfolgenden Vegetationsperiode eine untergeordnete Rolle, da nur Pflanzenelemente wie Rhizoide oder die Sprossachse den Winter überleben. So startet die Belagneubildung jedes Jahr bei null.

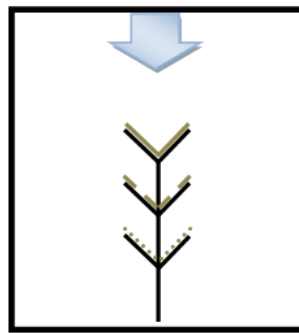
Die Belagbildung (Abbildung 51) konzentriert sich in den Becken 3A/B und 4A/B auf zwei unterschiedliche Prozesse. Einerseits erfolgt eine Sedimentation durch die Wasserschichten oberhalb der *Characeae*, andererseits eine Filterwirkung durch horizontale Wasserströmungen. So wird das Eisen auf verschiedene Arten auf den Pflanzen abgelagert und gefiltert.



**Abbildung 51** Erläuterung der Belagbildung am Extremstandort

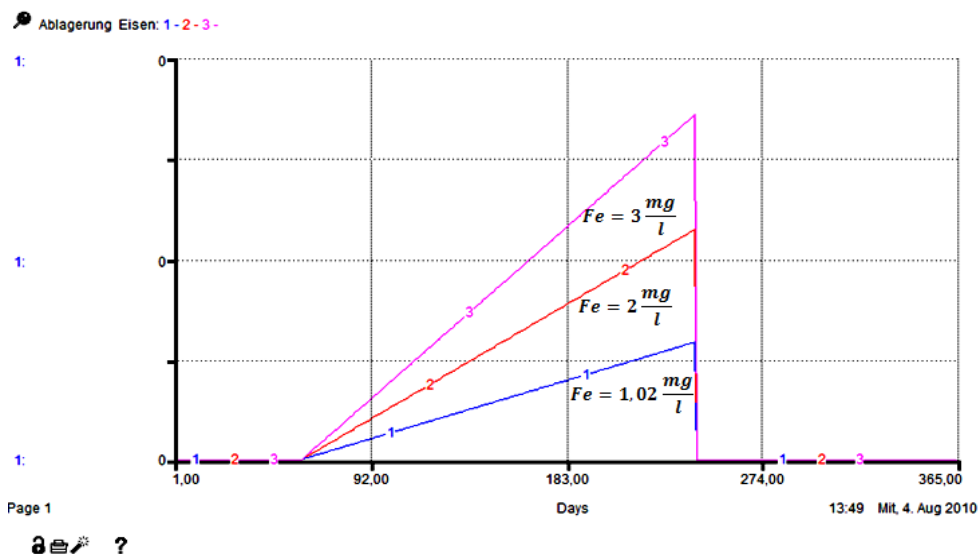
Prinzipiell muss im Modellkonzept des Extremstandortes jeden Tag die Schichtdicke des Belages in Abhängigkeit von der an diesem Tag gebildeten Biomasse betrachtet werden. So erhält neugebildete Biomasse in den darauffolgenden Tagen eine geringere Belagdicke als Biomasse, die schon einige Tage im Wasser vorhanden ist. Da die Biomassebildung höchstwahrscheinlich vertikal erfolgt, wird durch neugebildete Biomasse eine gewisse Schattenwirkung auf darunterliegende alte Biomasse

ausgeübt. Der Sachverhalt wird in *Abbildung 52* gezeigt. So ist die höhere Biomasse, zeitlich gesehen, im Wasser nicht so lange vorhanden, aber von stärkeren Belagablagerungen betroffen. Die untere Algensubstanz ist zwar länger den Eisenablagerungen ausgesetzt, wird durch das Wachstum von neuer Biomasse aber „beschattet“. Die Abscheidung wird im Modellkonzept immer auf 50% der Eisengehaltes im Wasser definiert. Derzeit ist es allerdings noch ungeklärt, wie diese Prozesse in den Becken der PBA Pöhla ablaufen. Da auch nicht immer 100% Deckung zu finden ist, verhält sich mit verschiedener *Characeae*-Belegung die Filterwirkung unterschiedlich. Hierzu werden noch Untersuchungen benötigt; die Beobachtungen sind derzeit noch zu vage. Eine erste Annäherung an den Sedimentationsprozess erfolgt mit einer Linearisierung der Schichtdicke. So werden die horizontalen Auswirkungen sichtbar (*Abbildung 51 - Ablagerung Eisen*), da eine Aufwuchsrate bekannt ist. Bestimmte Randbedingungen können aber trotzdem im Modellkonzept in Bezug auf die Biomasseneubildung nicht berücksichtigt werden.



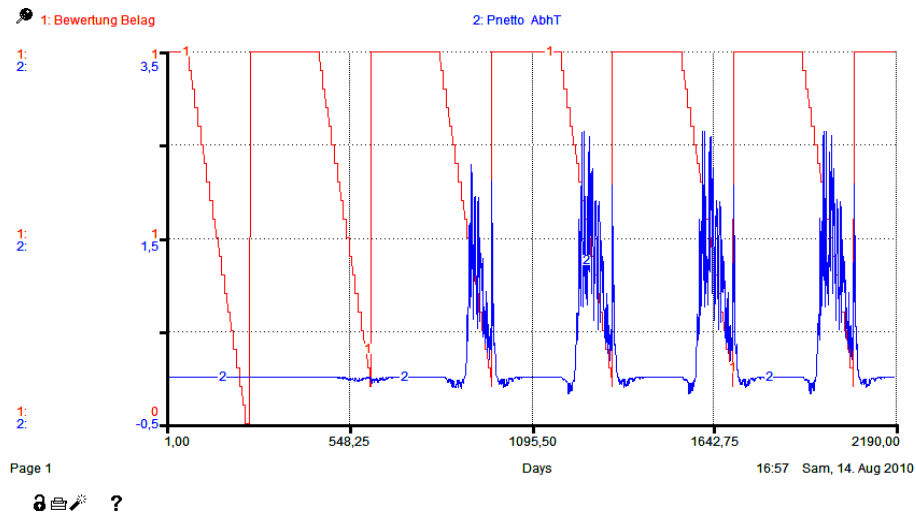
**Abbildung 52** Darstellung des Sedimentationsprozesses

Doch zunächst soll noch geprüft werden, ob sich mit einer Änderung der Eisenkonzentration im Wasser auch die Belagdicke ändert.



**Abbildung 53** Vergleich der Auswirkungen bei veränderter Eisenkonzentrationen

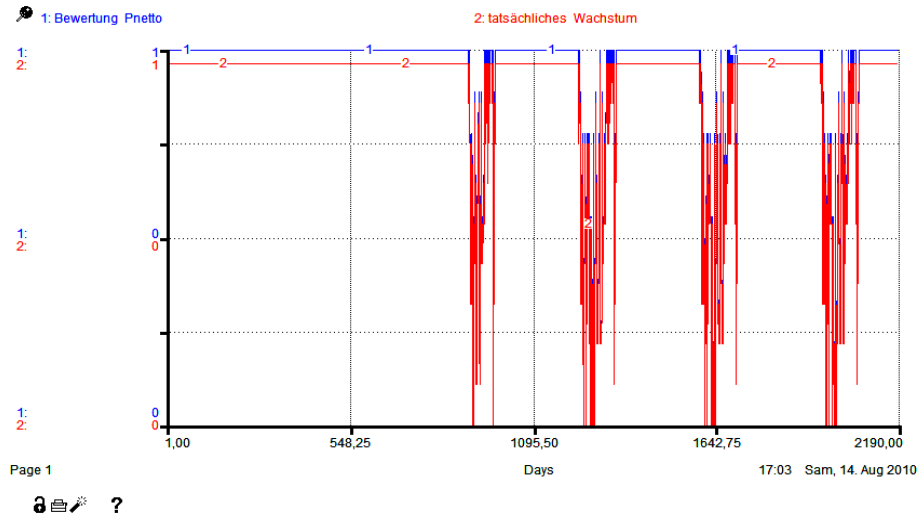
In *Abbildung 53* werden die Auswirkungen bei veränderter Eisenkonzentration sichtbar. Je höher die Eisenkonzentration ist, umso größer wird die Belagdicke. Mit der Linearisierung der Schichtdicke des Belages erfolgt eine Bewertung, die anschließend in Beziehung zu der Fotosynthese gebracht wird. Die Bereiche Fotosyntheseleistung und Strahlung sind hierzu äquivalent zum optimalen Standort. Ausschließlich in der Lichtabschwächung erfolgt eine Unterscheidung, in die die Bewertung des Belages einfließt.



**Abbildung 54** Darstellung der Nettofotosynthese mit der Bewertung des Belages

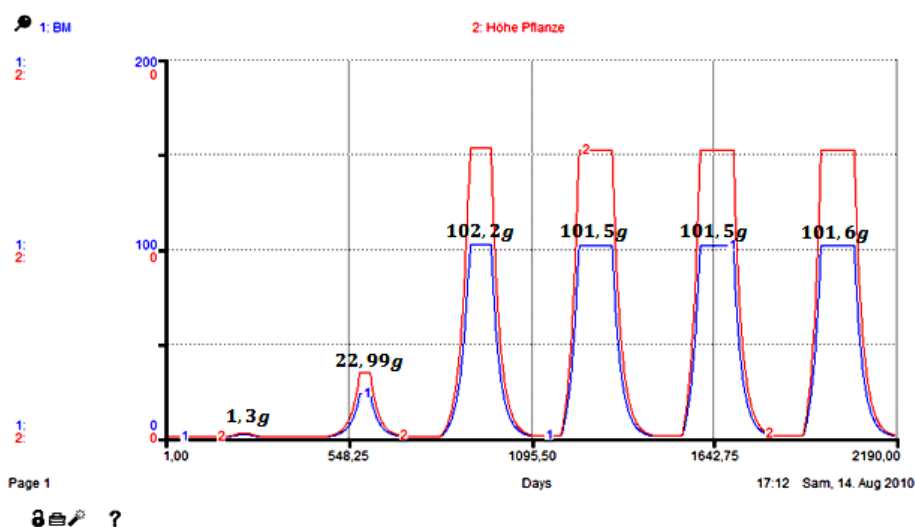
*Abbildung 54* zeigt die Primärproduktionsergebnisse und die Bewertung des Belages an. Hier fällt die Nettofotosynthese im ersten und im zweiten Jahr deutlich geringer aus, als in den Folgejahren. Einerseits ist die Primärproduktion der ersten Vegetationsperiode durch die verlängerte exponentielle Phase zu begründen, andererseits durch die größere Schichtdicke (vgl. *Abbildung 50*) des Belages und die dadurch resultierenden negativeren Bewertungen. Letzteres wird durch die rote Kurve in *Abbildung 54* dargestellt. Auch eine geringere Biomasseentwicklung von *Chara vulgaris* spielt eine Rolle. Dadurch können sich die Primärproduktionsleistungen nicht entfalten und positive Werte in den ersten beiden Vegetationsperioden annehmen. Über die Fotosyntheseleistung und diejenige am optimalen Standort wird hier eine Wertung der gesamten Nettofotosynthese am Extremstandort eingeführt. Diese wird anschließend mit dem *gewichteten Wachstumsfaktor* im tatsächlichen Wachstum kombiniert (vgl. *Abbildung 22*), sodass eine Gesamteinschätzung der Wachstums- einbuße unter extremen Bedingungen erfolgt. *Abbildung 55* zeigt diesen Sachverhalt. Das tatsächliche Wachstum weist lediglich im ersten Wachstumsjahr eine konstante Bewertung auf. Das Wachstum erfolgt hier mit 77,14%. Da in diesem Wertungssystem der Belag keine Rolle spielt, erfolgt die Beurteilung rein auf der Fotosyntheseleistung und den Wasserbedingungen. Die Primärproduktion ist in den ersten beiden

Vegetationsperioden so gering, dass keinerlei negative Abstufungen in Bezug auf das Algenwachstum erforderlich sind. Erst in den darauffolgenden Jahren weicht diese massiv vom optimalen Standort ab, sodass Entwicklungsbegrenzungen für die Regulation gebraucht werden.



**Abbildung 55** Darstellung der Fotosynthesebewertung und der Wertung des tatsächlichen Wachstums

Auch in der Biomasse spiegelt sich die nachteilige Bewertung des tatsächlichen Wachstums wider. *Abbildung 56* stellt diesen Sachverhalt dar. Erwartungsgemäß ist die Biomasseentwicklung in den ersten beiden Jahren deutlich geringer als in den Folgejahren. Grund hierfür ist einerseits die Anlaufphase, die von *Characeae* für die Entwicklung benötigt wird, andererseits der Belageinfluss. So kann am Extremstandort davon ausgegangen werden, dass die Biomasse von *Chara vulgaris* erst in der dritten Vegetationsperiode bestmöglich ausgewachsen ist und mit den Bedingungen „zurecht“ kommt. Vorher ist das Wachstum geringer als am optimalen Standort.



**Abbildung 56** Darstellung der BM und Pflanzenhöhe

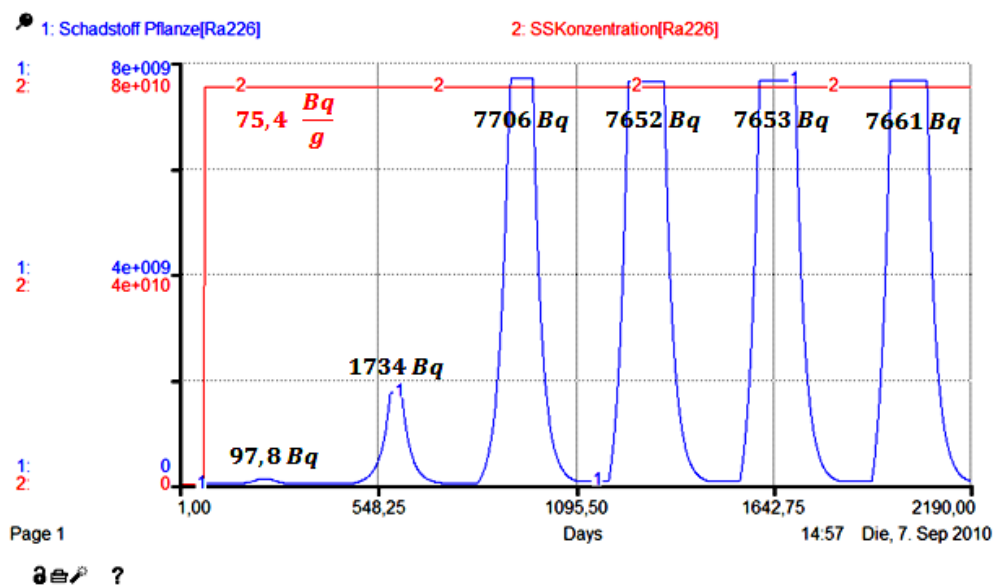
Die Schadstoffaufnahme in die Biomasse ist in der PBA Pöhla besonders wichtig. Das ist der Grundstock für den Einsatz von *Chara vulgaris* in den Becken 3A/B und 4A/B. Aufgrund der Definitionen der Werte der einzelnen Schadstoffkonzentrationen wird in *Abbildung 57* die Einlagerung von  $^{226}\text{Ra}$  dargestellt. Die Aktivität im Modellkonzept PBA ist deutlich höher als in dem der AZA, da hier die Konzentration an Radium im Wasser höher ist.

**Tabelle 18** Ergebnisse der Modellkonzepte hinsichtlich der Radiumkonzentration in *Chara vulgaris*

| Modellkonzept | $^{226}\text{Ra}$ im ersten Jahr $\left[\frac{\text{Bq}}{\text{kg}}\right]$ |
|---------------|---|
| AZA           | 2280  |
| PBA           | 75404   |

Die Schadstoffaufnahme in die Biomasse ist in der PBA Pöhla besonders wichtig. Das ist der Grundstock für den Einsatz von *Chara vulgaris* in den Becken 3A/B und 4A/B. Aufgrund der Definitionen der Werte der einzelnen Schadstoffkonzentrationen wird in *Abbildung 57* die Einlagerung von  $^{226}\text{Ra}$  dargestellt. Die Aktivität im Modellkonzept PBA ist deutlich höher als in dem der AZA, da hier die Konzentration an Radium im Wasser höher ist.

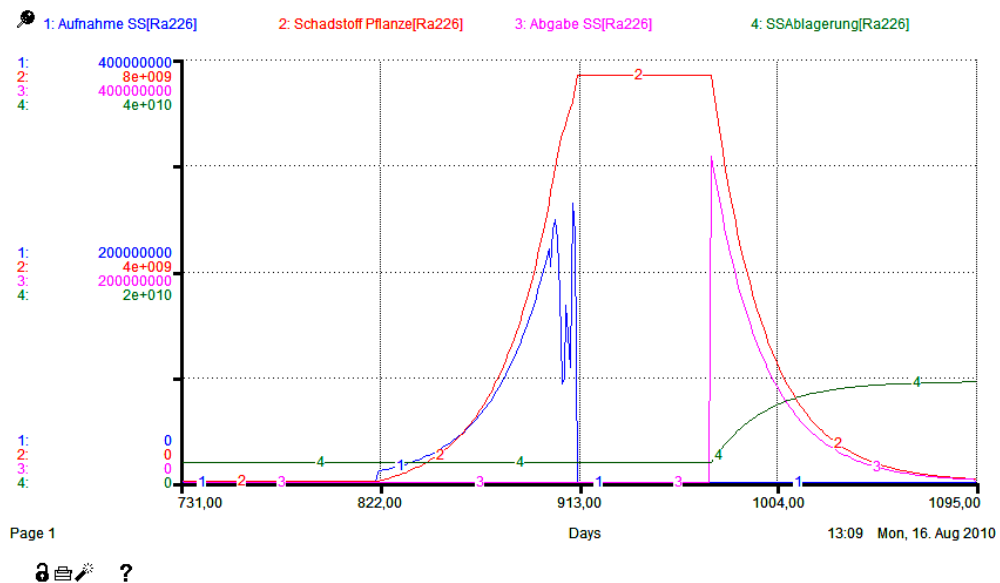
*Tabelle 18* zeigt die Unterschiede in beiden Modellkonzepten hinsichtlich der Radiumkonzentration auf. Gerade hier ist die deutlich größere Schadstoffaufnahme innerhalb des Wetlands Pöhla ersichtlich. In *Abbildung 60* wird dieser Sachverhalt noch einmal visuell dargestellt.



**Abbildung 57** Schadstoffeinlagerung in *Chara vulgaris*

In *Abbildung 57* wird deutlich, dass sich die Schadstoffaufnahme in die Pflanze nach der Biomasseentwicklung des Modellkonzeptes PBA richtet. Es werden kaum Aktivitäten über 7700 Bq überschritten.

Sowohl die gesamte Illustration der Schadstoffaufnahme in *Chara vulgaris* als auch die Ablagerung wird in *Abbildung 58* innerhalb des ersten Jahres aufgezeigt. Im Modellkonzept PBA ist die Biomasseproduktion zunächst geringer als am optimalen Standort. Trotzdem ist die Aufnahme an Radium größer. Hier richtet sich die Einlagerung exakt nach der Biomasseentwicklung.

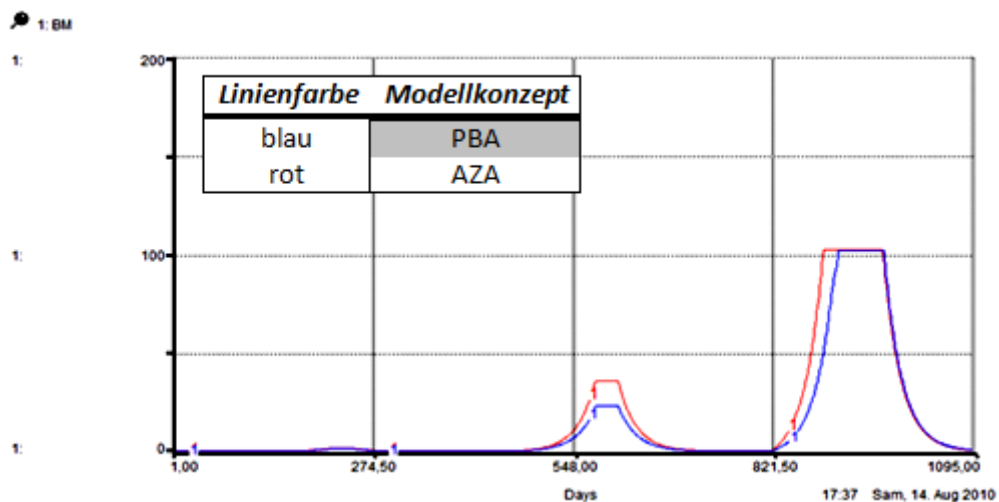


**Abbildung 58** Darstellung der Schadstoffaufnahme und -abgabe, der Schadstoffe in der Pflanze und der Schadstoffablagerung in Bezug auf die dritte Vegetationsperiode

### 3.2.4 Ergebnisdiskussion beider Standorte

Um die bedrohlicheren Bedingungen in der PBA Pöhla besser darstellen zu können, wird in der nachfolgenden Abbildung die Biomasseentwicklung der beiden Modellkonzepte gegenübergestellt (Abbildung 59).

Die Entwicklung von *Chara vulgaris* zeigt die Differenzen hauptsächlich im ersten Jahr auf. Hierbei sind das Biomassewachstum sowie die Entfaltung der Höhe unter den gegebenen Bedingungen der PBA Pöhla geschwächt. Innerhalb der optimalen Bedingungen erreicht die Biomasse in der dritten Vegetationsperiode die Stagnationsphase aufgrund des schnelleren Wachstums früher. In den Folgejahren gleichen sich die beiden Biomassen an. Zeitlich gesehen wird die Stagnationsphase in den Folgejahren am Extremstandort später als am optimalen Standort erreicht. Dadurch wird der Unterschied zwischen dem optimalen und dem extremen Standort deutlich. Die Entfaltung der Biomasse in der AZA geht zügiger voran. In der Literatur wird dieser Sachverhalt durch Sänger bestätigt, dass die Arten der Armleuchteralgen sowohl am autochthonen als auch am extremen Standort ähnliche Entwicklungen aufweisen (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2006a). Dies kann durch die beiden Modellkonzepte AZA und PBA bestätigt werden.



**Abbildung 59** Gegenüberstellung der Biomasse in der PBA und AZA (Beobachtungszeitraum 3 Jahre)

Um die Korrektheit der Pflanzenhöhe zu prüfen, wurden die Abschlussberichte von Dr. Sänger als Literaturnachweis herangezogen (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2008), (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2006a).

**Tabelle 19**      **Höhe der Pflanzen am Extremstandort**

| <i>Jahr</i> | <i>Höhe im<br/>Modellkonzept<br/>PBA[cm]</i> | <i>Art</i>            | <i>visuelle Beprobung<br/>am Extremstandort</i> |
|-------------|--|-----------------------|---|
| 1           | 0,39   | Chara contraria       | 25-60   |
| 2           | 6,8  | Chara globularis      | 14-35   |
| 3           | 30,6   | Chara hispida         | 20-40   |
| 4           | 30,4   | Chara polyacantha     | 20-40   |
| 5           | 30,5   | <b>Chara vulgaris</b> | <b>20-30</b>                                    |
| 6           | 30,5   |                       |   |

Die Ergebnisse der Wuchshöhen des Modellkonzeptes PBA sind in der Tabelle links dargestellt. Alle Werte liegen innerhalb der Beobachtungen der PBA Pöhla. So ist die Entwicklung der Pflanzen hinsichtlich der gegebenen Bedingungen in der PBA vom zweiten Jahr an nicht so drastisch wie zunächst vermutet.

In *Tabelle 20* werden die Wuchshöhen über sechs Jahre hinweg aus dem Modellkonzept AZA dargestellt. Im Vergleich dazu erfolgt eine Abbildung der Beobachtungen an autochthonen Standorten. *Chara vulgaris* wächst im Durchschnitt ab der dritten Vegetationsperiode im Modellkonzept AZA 31cm hoch. Das bestätigen auch die Betrachtungen an natürlichen Gewässern. *Dr. Sänger* gibt auch in Anlage 2 des Abschlussberichtes von 2008 (*Dr. Sänger, Abschlussbericht 2008*) an, dass die Biomasseentwicklung in der AZA gleich der in natürlichen Gewässern ist. So wird im Modellkonzept AZA eine bessere Entwicklung der Alge entgegen dem Modellkonzept PBA beobachtet, auch wenn die Ergebnisse kaum merklich voneinander abweichen.

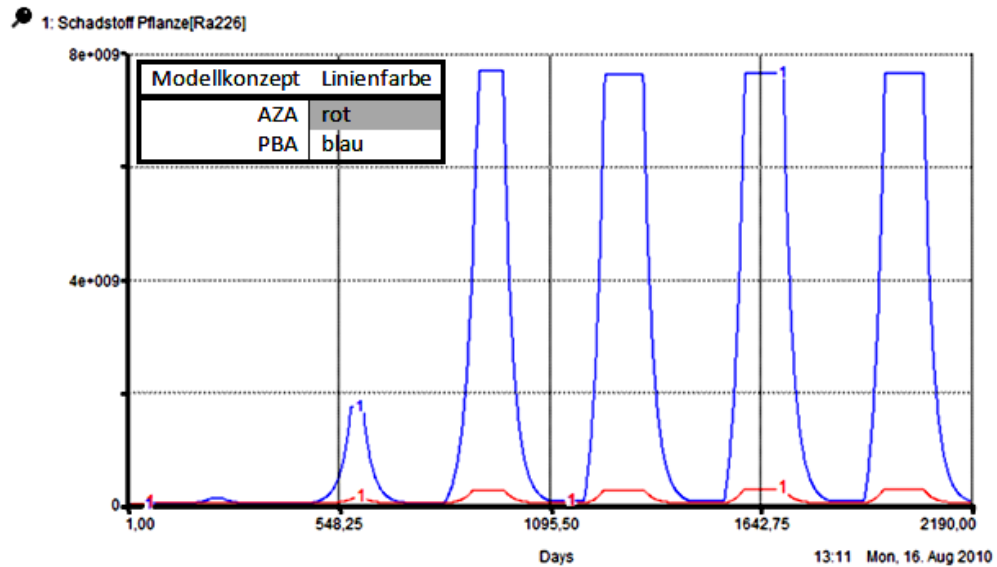
**Tabelle 20**      **Höhe der Pflanzen am optimalen Standort**

| <i>Jahr</i> | <i>Höhe im<br/>Modellkonzept AZA<br/>[cm]</i> | <i>Art</i>            | <i>visuelle Beprobung<br/>an autochthonen<br/>Gewässern</i> |
|-------------|---|-----------------------|---|
| 1           | 0,48  | Chara contraria       | 25-60   |
| 2           | 10,8  | Chara globularis      | 14-35   |
| 3           | 30,7  | Chara hispida         | 20-40   |
| 4           | 30,9  | Chara polyacantha     | 20-40   |
| 5           | 31,1  | <b>Chara vulgaris</b> | <b>20-30</b>  |
| 6           | 31,3  |                       |   |

Um die Ablagerung der Schadstoffe zu überprüfen, wird das relevante Element Radium in *Abbildung 60* gezeigt. Die Illustration zeigt den Unterschied beider Modellkonzepte deutlich auf. Die aufgenommene Aktivität am optimalen Standort ist erkennbar geringer. Dies ist in der Natur auf die geringere Konzentration des Radiums im Wasser zurück-zuführen und im Modellkonzept AZA begründet durch die geringere Schadstoffkonzentration in der Biomasse. Der Grundgedanke des Einsatzes von Armleuchter-



algen in das „constructed wetland“ wird hier besonders deutlich. *Chara vulgaris* erfüllt in diesem Zusammenhang ihre Anforderung und wird den Erwartungen gerecht. Natürlicherweise muss auch berücksichtigt werden, dass ein Großteil der Biomasse jedes Jahr abstirbt und am Boden sedimentiert. Das Radium bleibt eine Zeit weiterhin in der Algenbiomasse gebunden; doch kann durch Zersetzungsprozesse die erneute Freisetzung ins Wasser nicht verhindert werden.



**Abbildung 60** Gegenüberstellung der Schadstoffablagerung am Beispiel des Elementes  $^{226}\text{Ra}$  und der abgestorbenen Biomasse beider Modellkonzepte

## 4 Mögliche Modellerweiterungen

Die Modellkonzepte für den optimalen Standort und den Extremstandort sind in *iThink*<sup>®</sup> bestmöglich dargestellt. Auf der Grundlage von vielen Annahmen und Definitionen, die im Modell getroffen wurden, besteht dennoch die Möglichkeit einer Erweiterung. Nahezu jede Hypothese, wie etwa die Wachstumsgröße oder die Abstufungsbewertung, kann durch Experimente über eine ganze Vegetationsperiode hinweg überprüft und gegebenenfalls im Modell ersetzt und berichtigt werden. Aufgrund des begrenzten Untersuchungszeitraumes konnte dies nicht während der Praktikums- und Bachelorarbeitsphase durchgeführt werden.

Da die Modellierung auf einer einzigen *Chara vulgaris*-Pflanze beruht, kann diese Vereinfachung auf einen ganzen *Characeae*-Bestand erweitert werden. Hierbei müssen aber einige Sachverhalte berücksichtigt werden, wie etwa das Konkurrenzverhalten durch andere Pflanzen. Aber auch die Beschattung durch höher gewachsene Organismen spielt eine wichtige Rolle. Bei der Überführung der Modellkonzepte zu gesamten Organismenverbänden kann beispielsweise eine Fläche von  $1m^2$  angenommen werden. Hier kommen die Vektoren Konkurrenz und Beschattung hinzu. Bei der Schaffung einer Pflanzenkolonie müssen bei der Modellierung gewisse Regeln geschaffen werden, und zwar nach einem Prinzip, wie in *Abbildung 61* dargestellt.

|   |   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|---|
|   | x | x |   | x |   |
| x |   | x | x |   | x |
|   | x | • |   | x |   |
| x | x |   | • | x | x |
|   | • | x | x |   | x |
| x | x | x |   | x | x |

**Abbildung 61** Regeln für eine Modellerweiterung auf eine Pflanzenkolonie von  $1m^2$

Die freien Flächen zeigen keinen Bewuchs auf, die Kreuze verdeutlichen eine Konkurrenzpflanze, und der Punkt gibt eine *Chara vulgaris*-Pflanze an. Wenn keine Konkurrenzpflanze in der Nähe von *Chara vulgaris* ist, könnte angenommen werden, dass hier die Modellpflanze hundertprozentiges Wachstum aufweist. In Bezug auf die benachbarten Kreuze müsste so eine Abstufungsbewertung vorgenommen werden. So gilt: Je mehr Nachbarn *Chara vulgaris* hat, desto größer wird der Konkurrenzkampf sowie die Beschattung. Letztere kann im Bereich der Strahlung und der Fotosyntheseleistung eingebracht werden, da beide eine große Rolle spielen. Doch welche Pflanzen sind bezüglich *Chara vulgaris* Konkurrenten? Dr. Pietsch hat hierzu

Untersuchungen durchgeführt und konnte einige Mitbewerber von *Chara vulgaris* aufzeigen (Pietsch, 1987).

**Tabelle 21**      Mögliche Konkurrenten für *Chara vulgaris*

| <i>lateinischer Name</i>      | <i>deutscher Name</i>          |
|-------------------------------|--------------------------------|
| <i>Chara fragilis</i>         | Zerbrechliche Armleuchteralge  |
| <i>Nitellopsis obtusa</i>     | Stern-Armleuchteralge          |
| <i>Chara delicatula</i>       | Feine Armleuchteralge          |
| <i>Chara aspera</i>           | Raue Armleuchteralge           |
| <i>Chara contraria</i>        | Gegensätzliche Armleuchteralge |
| <i>Utricularia vulgaris</i>   | Gewöhnlicher Wasserschlauch    |
| <i>Potamogeton pectinatus</i> | Kamm-Laichkraut                |
| <i>Myriophyllum spicatum</i>  | Ähriges Tausendblatt           |
| <i>Ceratophyllum demersum</i> | Raues Hornblatt                |
| <i>Potamogeton lucens</i>     | Spiegelndes Laichkraut         |
| <i>Potamogeton natans</i>     | Schwimmendes Laichkraut        |
| <i>Nuphar luteum</i>          | Gelbe Teichrose                |

In dieser Tabelle wird die Konkurrenz mit den Laichkräutern besonders deutlich. Auch eine Teichrose ist für *Chara vulgaris* ein Konkurrent, da diese der Pflanze Licht entzieht.

Die Beschattung spielt aber auch in der Einteilung der Pflanze in obere und untere Bereiche, wie in *Abbildung 37* beschrieben, eine wichtige Rolle. Die Einbindung solcher Faktoren wäre ebenfalls eine Möglichkeit der Modellerweiterung. Hierfür müssen für die Zweigorientierung bestimmte Regeln getroffen werden. Eine Abstufungsbewertung in Abhängigkeit der Lichtverfügbarkeit wäre sinnvoll.

Die beiden Modellkonzepte werden derzeit in Tagen über mehrere Jahre hinweg simuliert. Hier könnte  $dt$  verringert werden, sodass auch einzelne Tagesgänge sichtbar werden. Hierfür müssen einige Komponenten hinzugefügt werden, wie etwa der Unterschied zwischen Assimilations- und Dissimilationsprozessen, die bislang vernachlässigt wurden. Die Aufnahme von Schadstoffen könnte auch tageszeitabhängig in Bezug auf die Primärproduktionsprozesse dargestellt werden. Die Daten für die einzelnen Tagesgänge von *Walsby* (Walsby A. E., 1997) liegen vor und können in Beziehung zu der gemessenen Globalstrahlung gebracht werden.

Auch eine Erweiterung für mehrere Pflanzenarten ist möglich. Hierfür muss eine Matrix anstelle der Vektoren eingefügt werden. Es entsteht ein zweidimensionales System. Die Grundelemente im Modell bleiben identisch, lediglich die einzelnen Parameter, wie etwa Toleranzbereiche, verändern sich. Die Modellerweiterung ist allerdings nur möglich, wenn ein Array nicht die Werte eines Imports aus einer *Excel*<sup>®</sup>-Tabelle erhält.

Im weiteren Verlauf kann auch eine Beziehung zwischen dem Bereich „Schadstoff“ und den WIS hergestellt werden. Hierfür müssen noch weitere Untersuchungen angestellt werden. Ein Vorschlag wäre einerseits eine zeitlich gleichwertige Beprobung der Wasserparameter und andererseits die Konzentration der Schadstoffe in der Pflanze. So kann der Schadstoffeinbau in die Biomasse in Abhängigkeit von den Wasserparametern im Modell eingebettet werden.

Die Möglichkeit einer Erweiterung der Wachstumskomponenten auf eine Gleichgewichtseinstellung von Zuwachs- und Sterberate kann ebenfalls in die Modelle eingefügt werden. So wird die stationäre Phase nicht über einen Wert bezüglich der maximal erreichbaren Biomasse definiert, sondern über die Definition von Zuwachs- und Sterberate.

Auch der Schalter für die Auswahl eines Jahres kann erweitert werden. Hier bestünde die Möglichkeit, verschiedene Jahre (Trockenjahr, Nassjahr, Normaljahr) hintereinander zu schalten, sodass die Modellierung nicht nur auf eine Globalstrahlungsart beschränkt wird. Der Grundstock für die Erweiterung um die jeweiligen Globalstrahlungswerte ist vorhanden.

Die Belagberechnung im Modellkonzept PBA kann an eine Komponente der Belagabnahme angepasst werden. Hier würde sich die Abnahme nicht über *HilfZeitEisen* definieren, sondern über die Abhängigkeit von der Biomasse.

Auch die Schadstoffeinlagerung während der stationären Phase kann fortan definiert werden, da derzeit keine Aufnahme während dieser Phase erfolgt. Dies wurde nicht eingefügt, weil die Schadstoffaufnahme derzeit von der Biomasseentwicklung abhängig ist. So muss die Einlagerung unabhängig vom Eintreten einer stationären Phase in *iThink*® eingefügt werden.

Als Abschluss für die Modellierung der optimalen und der extremen Bedingungen wäre eine Integration in ein einziges *iThink*®-Modell denkbar. Hier werden gemeinsame bzw. gleiche Programmteile zusammen in einem Teilbereich zusammengefasst. Unterschiedliche Elemente können über einen Entscheidungsvektor aufgerufen werden. Hierfür muss entschieden werden, welche Bedingungen an dem gegebenen Standort herrschen sollen. Je nach der Entscheidung des Nutzers werden die verschiedenen Wasserparameter, die Beckenhöhe oder etwa die verschiedenen Strahlungsbedingungen integriert. So kann spezifisch für jeden Standort das Pflanzenwachstum in einem einzigen Modell simuliert werden.

## 5            **Bewertung des Arbeitsergebnisses**

In der vorliegenden Arbeit wurde versucht, die in *Abschnitt 1* „Motivation“ genannten Probleme zu erörtern und Antworten auf dort gestellte Fragen zu geben. Offensichtlich konnten studien- und entwicklungsbedingte Lücken geschlossen werden. In der Folgezeit ist es für Interessenten möglich, rationeller und möglicherweise erfolgversprechender als bisher mit der vorhandenen Literatur über *Characeae* (Armleuchteralgen) zu forschen. Das vom Verfasser erarbeitete Modellkonzept bildet natürlich erst ein Grundgerüst für eine Standortprüfung bestimmter Pflanzenarten und ist deshalb noch nicht im gewünschten Maß benutzerfreundlich. Trotzdem darf erwartet werden, dass für weitere Arbeiten auf diesem Gebiet einige Hilfen gegeben werden konnten.

## Literaturverzeichnis Abbildungen

Die nicht genannten Abbildungen, die in der Arbeit aufgeführt sind, stammen vom Verfasser.

|                     |  |
|---------------------|--|
| Abbildung 2         | (Hermann & Jobski, 2010)               |
| Abbildung 3         | (Google)                               |
| Abbildung 4         | (B.P.S. Engineering Zwickau (2), 2008) |
| Abbildung 5         | (Jassby & Platt, Juli 1976)            |
| Abbildung 6         | (Vaughan, Davis, & Walsby, 2001)       |
| Abbildung 7         | (Schubert & Marquardt, 2009)           |
| Abbildung 8         | (Schubert & Marquardt, 2007)           |
| <i>Abbildung 9</i>  | (Schubert & Marquardt, 2007)           |
| <i>Abbildung 10</i> | (Schubert & Marquardt, 2007)           |
| <i>Abbildung 29</i> | (Dr. Sängner, Abschlussbericht 2008)   |

## Literaturverzeichnis Tabellen

Die nicht genannten Tabellen, die in der Arbeit aufgeführt sind, stammen vom Verfasser.

|                   |  |
|-------------------|--|
| <i>Tabelle 1</i>  | (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) |
| <i>Tabelle 2</i>  | (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) |
| <i>Tabelle 3</i>  | (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) |
| <i>Tabelle 4</i>  | (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) |
| <i>Tabelle 5</i>  | (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2007)    |
| <i>Tabelle 6</i>  | (isee systems®, 2010)                  |
| <i>Tabelle 7</i>  | (LfULG, 2009)                          |
| <i>Tabelle 8</i>  | (Dr. Breitig & Dr. von Tümpling, 1971) |
| <i>Tabelle 10</i> | (Kali AG Potasse SA, 2009)             |
| <i>Tabelle 11</i> | (Heimbiotop GbR, 2009)                 |
| <i>Tabelle 13</i> | (WISUTEC GmbH, 2008-2009)              |
| <i>Tabelle 14</i> | (WISUTEC GmbH, 2004-2008)              |
| <i>Tabelle 17</i> | (WISUTEC GmbH, 2008-2009)              |
| <i>Tabelle 19</i> | (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2006a)   |
| <i>Tabelle 20</i> | (Dr. Sänger, Abschlussbericht 2006a)   |
| <i>Tabelle 21</i> | (Pietsch, 1987)                        |

## Literaturverzeichnis Gleichungen

Die nicht genannten Gleichungen, die in der Arbeit aufgeführt sind, stammen vom Verfasser.

|                     |                                       |
|---------------------|---------------------------------------|
| <i>Gleichung 2</i>  | (Gut, 2001)                           |
| <i>Gleichung 3</i>  | (Gut, 2001)                           |
| <i>Gleichung 8</i>  | (Arbeitsgruppe Meeresphysik, SS 2006) |
| <i>Gleichung 9</i>  | (Arbeitsgruppe Meeresphysik, SS 2006) |
| <i>Gleichung 10</i> | (Arbeitsgruppe Meeresphysik, SS 2006) |
| <i>Gleichung 11</i> | (Vaughan, Davis, & Walsby, 2001)      |



## **Anlagenverzeichnis**

Anlage 1

Anlage 2

Anlage 3

Anlage 4

Anlage 5

Anlage 6

Anlage 7

Anlage 8

## Literaturverzeichnis

Arbeitsgruppe Meeresphysik. (SS 2006). *Versuch Transmissionsphotometrie*. Abgerufen am 13. August 2010 von <http://las.physik.uni-oldenburg.de/teaching/SS2006/Transmissionsphotometrie.pdf>

B.P.S. Engineering Zwickau (1). (2007). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 1*. Zwickau.

B.P.S. Engineering Zwickau (2). (2008). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 2*. Zwickau.

B.P.S. Engineering Zwickau (3). (2008). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 3*. Zwickau.

B.P.S. Engineering Zwickau (4). (2008). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 4*. Zwickau.

B.P.S. Engineering Zwickau (5). (2007). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 5*. Zwickau.

B.P.S. Engineering Zwickau (6). (2008). *Passiv biologische Wasserbehandlungsanlage Pöhla der Niederlassung Aue - Betriebshandbuch Teil 6*. Zwickau.

Bachmann, S., & Strulik, H. (1996). *SoWhat - Ein Programm zur einfachen Simulation dynamischer Systeme*. Abgerufen am 6. Mai 2010 von <http://kaldor.vwl.uni-hannover.de/holger/software/sowhat.pdf>

Berger, J., & Schagerl, M. (2003). *Allelopathic activity of Chara aspera*. Österreich: Hydrobiologia 501: 109-115.

Bonis, A., & Grillas, P. (2002). Deposition, germination and spatio-temporal patterns of charophyte propaule banks: a review. *Aquatic Botany* 72 , S. 235 - 248.

CONSIDEO GmbH. (2010). *CONSIDEO GmbH*. Abgerufen am 1. Juli 2010 von <http://www.consideo-modeler.de>

Crawford, S. A. (1976). *Chemical, physical and biological changes associated with Chara succession in farm ponds*. New York.

Dr. Breitig, G., & Dr. von Tümping, W. (1971). *Ausgewählte Methoden der Wasseruntersuchung: Band 2 Biologische, mikrobiologische und toxikologische Methoden*. Jena: Gustav Fischer Verlag.

Dr. Breitig, G., & von Dr. Tümping, W. (1982). *Ausgewählte Methoden der Wasseruntersuchung: Band II, Biologische, mikrobiologische und toxikologische Methoden*. Berlin: Gustav Fischer Verlag Jena.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2005). *Unterstützung bei der Ansiedlung von Characeen im Rahmen der passiv-biologischen Behandlung des Grubenwassers*. Crimmitschau.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2007). *Unterstützung bei der Anzucht von Characeen Standort Pöhla*. Crimmitschau.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2008). *Unterstützung bei der Optimierung der Characeen-Bestände in der passiv-biologischen Anlage Pöhla und der Anzuchtanlage*. Crimmitschau.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2007). *Unterstützung bei der weiteren Etablierung des Characeenbestandes in der Anlage zur passiv-biologischen Behandlung von Grubenwasser am Standort Pöhla*. Crimmitschau.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2006a). *Unterstützung bei der weiteren Etablierung eines Characeenbestandes in der Anlage zur passiv-biologischen Behandlung von Grubenwasser am Standort Pöhla*. Crimmitschau.

Dr. Sängers, H. (Abschlussbericht 2006b). *Unterstützung beim Betrieb einer Pilotanlage zur Anzucht von Characeen am Standort Pöhla*.

GoldSim Technology Group. (2010). *Goldsim®*. Abgerufen am 1. Juli 2010 von <http://www.goldsim.com/>

Google. (kein Datum). *Google earth*. Abgerufen am 22. Mai 2010 von <http://earth.google.com/intl/de/>

Google. (kein Datum). *Google maps Deutschland*. Abgerufen am 20. April 2010 von [http://maps.google.de/maps?f=q&source=s\\_q&hl=de&q=&vps=2&jsv=257c&sll=50.511224,12.816954&sspn=0.027291,0.077162&g=p%C3%B6hla&ie=UTF8&geocode=FXi9AgMdOpLDAA&split=0](http://maps.google.de/maps?f=q&source=s_q&hl=de&q=&vps=2&jsv=257c&sll=50.511224,12.816954&sspn=0.027291,0.077162&g=p%C3%B6hla&ie=UTF8&geocode=FXi9AgMdOpLDAA&split=0)

Grillas et al, P. (1992). *Submerged macrophyte seed bank in a Mediterranean temporary marsh: abundance and relationship with established vegetation*. *Oecologia* 94: 1-6.

Gut, J. (2001). *Exponentielles Wachstum*. Abgerufen am 10. Juni 2010 von <http://members.chello.at/gut.jutta.gerhard/kurs/expofunkt.htm>

Heimbiotop GbR. (2009). Abgerufen am 1. Juni 2010 von <http://www.heimbiotop.de/ernae.htm#N%C3%A4hrstoffangebot>

Hermann, E., & Jobski, S. (8. Juni 2010). B.P.S. Engineering GmbH. *Grundgedanken zur Simulation biologischer Systeme - Anwendungsfall „Wetland Pöhla“*. Freiberg, Sachsen.

isee systems®. (2010). *isee systems®*. Abgerufen am 2. Juli 2010 von <http://www.iseesystems.com/>

Jassby, A. D., & Platt, T. (Juli 1976). *Mathematical formulation of the relationship between photosynthesis and light for phytoplankton*. Bedford Institute of Oceanography; Dartmouth; Scotia (540-547).

Just, M., & Krause, R. (2008). Abgerufen am 14. April 2010 von <http://web.me.com/kuma.mj/ParsteinerSeeUnterwasserwelt/Characeen.html>

Kali AG Potasse SA. (2009). *Nährstoffe, Mangelsymptome und deren Behebung*. Abgerufen am 1. Juni 2010 von <http://www.potasse.ch/d/service/dokumentation/naehrstoff/naehrstoffmangel.htm>

Kalin, M. (2003). *Ecosystem Restoration in the Rabbit Lake Drainage Basin; Retaining 226Ra and Uranium; Within the Waste Management Area*. Toronto: Boojum Research Ltd.

Kalin, M., & Smith, M. P. (2007). *Germination of Chara vulgaris and Nitella flexilis oospores: What are the relevant factors triggering germination?* Toronto: Boojum Research Limited; *Aquatic Botany* 87 (2007) 235–241.

Kalin, M., Smith, M. P., & Wittrup, M. B. (2002). *Ecosystem restoration incorporating minerotrophic ecology and Stoneworts that accumulate 226Ra*. Freiberg: Proceedings of the Uranium Mining and Hydrogeology III Konferenz.

Krause, W. (1997). *Süßwasserfloa von Mitteleuropa - Charales (Charophyceae); Band 18*. Jena, Stuttgart, Lübeck, Ulm: Gustav Fischer Verlag.

- Kuczynaska-Kippen, N., & Klimaszyk, P. (2007). *Diel microdistribution of physical and chemical parameters within the dense Chara bed and their impact on zooplankton*. Bratislava: Biologia 62, Section Botany: 432-437.
- Küster, A., & Altenburger, R. (2006). *Development and validation of a new fluorescence-based bioassay for aquatic macrophyte species*. Leipzig: ScienceDirect.
- Kufel, L., & Kufel, I. (2002). Chara beds acting as nutrient sinks in shallow lakes - a review. *Aqua Botany* 72 , S. 249 - 260.
- LfULG. (2009). *Darstellung auf der Grundlage von Daten des Sächsischen Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Datenerhebung: Betriebsgesellschaft für Umwelt und Landwirtschaft*. Dresden.
- Mulderij, G., Van Donk, E., & J.G.M., R. (2003). *Differential sensitivity of green algae to allelopathic substances from Chara*. Niederlande: Hydrobiologia 491: 261-271.
- Pietsch, W. (1987). *Zur Vegetation der Charetea-Gesellschaften der Mitteleuropäischen Tiefebene*. Studia Phytologica nova in Honor. A.O. Horvat.
- Pietsch, W. (1987). *Zur Vegetation der Charetea-Gesellschaften der Mitteleuropäischen Tiefebene*. Studia Phytologica noba in hororem jubilantis A.O. Horvat.
- Powersim Software AS. (kein Datum). *Powersim®*. Abgerufen am 1. Juli 2010 von 2010: <http://www.powersim.com/>
- Prof. Dr. habil. Dudel, E. G. (2006). *Naturnahe Methoden zur langfristigen Sickerwasserbehandlung der industriellen Absetzanlage Helmsdorf*. Freistaat Sachsen: sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie.
- Prof. Dr. Jüngel, A. (Sommer 2003). *Mathematische Modellierung mit Differentialgleichungen*. Johannes Gutenberg Universität Mainz: Fachbereich Mathematik, Informatik.
- Prof. Dr. rer. nat. Labudde, D. (8. November 2009). *Studiengang Biotechnologie/Bioinformatik. Vorlesungsskript BioAlgorithmen -Algroithmenentwurf-* . FH Mittweida: Fachbereich Mathematik, Naturwissenschaften, Informatik.
- Riza Institute for Inland Water Management and Waste Water Treatment. (1999). *Stoneworts, valuable for water management*. Lelystad.

- Schneider, S., Ziegler, C., & Melzer, A. (2006). *Growth towards light as an adaption to high light conditions in Chara branches*. Deutschland: New Phytologist, 172: 83-91.
- Schubert, H., & Marquardt, R. (2007). *Abschätzung des Belageinflusses auf die Characeen-Bestände der Versuchsanlage „Wetland-Pöhl“*. Rostock: WISUTEC GmbH.
- Schubert, H., & Marquardt, R. (2009). Photosynthetic characterisation of *Chara vulgaris* in bioremediation ponds. *Charophytes (2009) Volume 2 (1)* , 1-8.
- Schulze, C. F. (1773). Flora von Dresden. *Handschriftliches Maunskript* . Dresden.
- Schwarz et al, A.-M. (2002). Species-specific depth zonation in New Zealand charophytes as a function of light availability. *Aquatic Botany* 72 , S. 209 - 217.
- Sederias, J., & Colman, B. (2009). *Inhibition of Chara vulgaris oospore germination by sulfidic sediments*. Toronto: Aquatic Botany 91: 273-278.
- Steffens, B. (kein Datum). *Modul biol 108 - „Labortechnik und Methodik“*. Abgerufen am 13. August 2010 von <http://www.uni-kiel.de/biologie/Material/Matbiol108/Photometrie-Vorlesung%20Handout.pdf>
- Stroede, W. (1933). *Über die Beziehung der Characeen zu den chemischen Faktoren der Wohngewässer und des Schlammes* . Archiv 1, Hydrobiologie, Band 15.
- Tett, P. (17. November 2003). *Eutrophication in: Aquatic Ecosystem Management; Light and phytoplankton growth*. Abgerufen am 20. Mai 2010 von <http://www.lifesciences.napier.ac.uk/teaching/Eu/mul.htm>
- Van de Weyer, K., & Krautkrämer, V. (2009). *Nitella opaca (Bruzellius) Agardh im Steinbruch Messinghausen (Sauerland)- mit einer Übersicht der maximalen unteren Makrophyten-Tiefengrenzen in Deutschland*. Rostock: Rostock. Meeresbiolog. Beitrag, Heft 22: 57-64.
- Van de Weyer, K., Neumann, J., Pietsch, W., Pätzolt, J., & Tigges, P. (2009). *Die Makrophyten des Senftenberger Sees*. Naturschutz und Landschaftspflege in Brandenburg 18 (3): 88-95.
- Van den Berg et al., M. S. (2002). A comparativ study of the use of inorganic carbon resources by *Chara aspera* and *Potamogeton pectinatus*. *Aquatic Botany* 72 , S. 219-233.

Vaughan, I., Davis, P., & Walsby, A. (2001). *Changes in the photosynthetic coefficients  $a$  and  $P_m$  of *Planktothrix rubescens* grown on light-dark cycles*. United Kingdom: © Birkhäuser Verlag, Basel; Aquat.sci.63 (350–362).

Ventana Systems, Inc. (2010). *Vensim®*. Abgerufen am 1. Juli 2010 von <http://www.vensim.com/>

Walsby, A. E. (1997). , Numerical integration of phytoplankton photosynthesis through time and depth in a water column: New Phytologist. v. 136 , S. 189-209.

Walsby, A. E. (2001). *Determining the photosynthetic productivity of a stratified phytoplankton population*. United Kingdom: © Birkhäuser Verlag, Basel, 2001; Aquat.sci.63 (18–43).

Wang, H., & Xiao, K. (2008). *The interactive effects of irradiance and photoperiod on *Chara vulgaris* L.: concerted responses in morphology, physiology, and reproduction*. Hydrobiologia 610: 33-41.

WISUTEC GmbH. (2008-2009). *Charabeprobung*. Chemnitz.

WISUTEC GmbH. (2004-2008). *Wasseranalyse*. Pöhla.

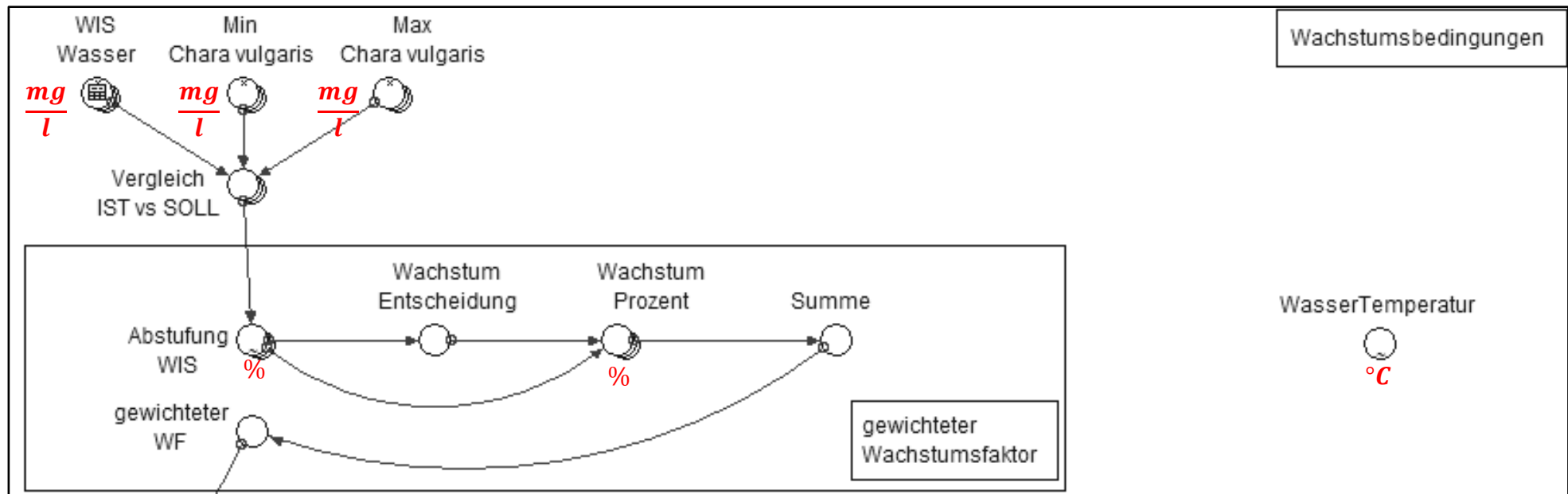
## **Anlage 1**

### **Erläuterung zu der spezifischen Einheit jedes Elementes in den Modellkonzepten AZA und PBA**

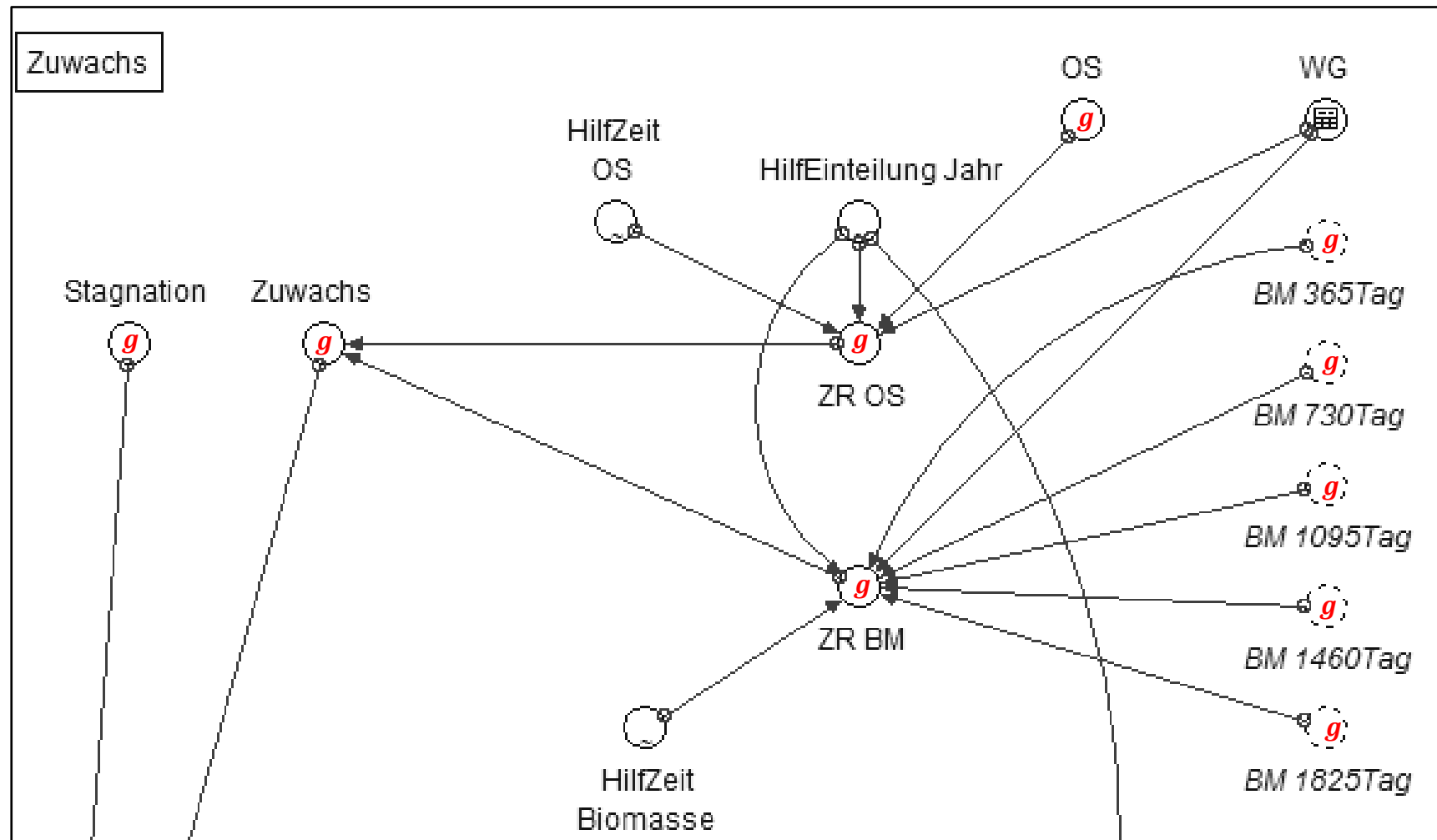
*Die Darstellung der Einheiten ist nicht auf ein spezifisches Modellkonzept bezogen. Hauptsächlich wurden die Illustration vom Modellkonzept AZA entnommen. Hier können einige Unterschiede hinsichtlich der Darstellung zum Modellkonzept PBA entstehen. Die Einheiten sind in beiden Modellkonzepten aber äquivalent. Die Erläuterung des Belagbereiches bezieht sich rein auf das Modell des Extremstandortes.*



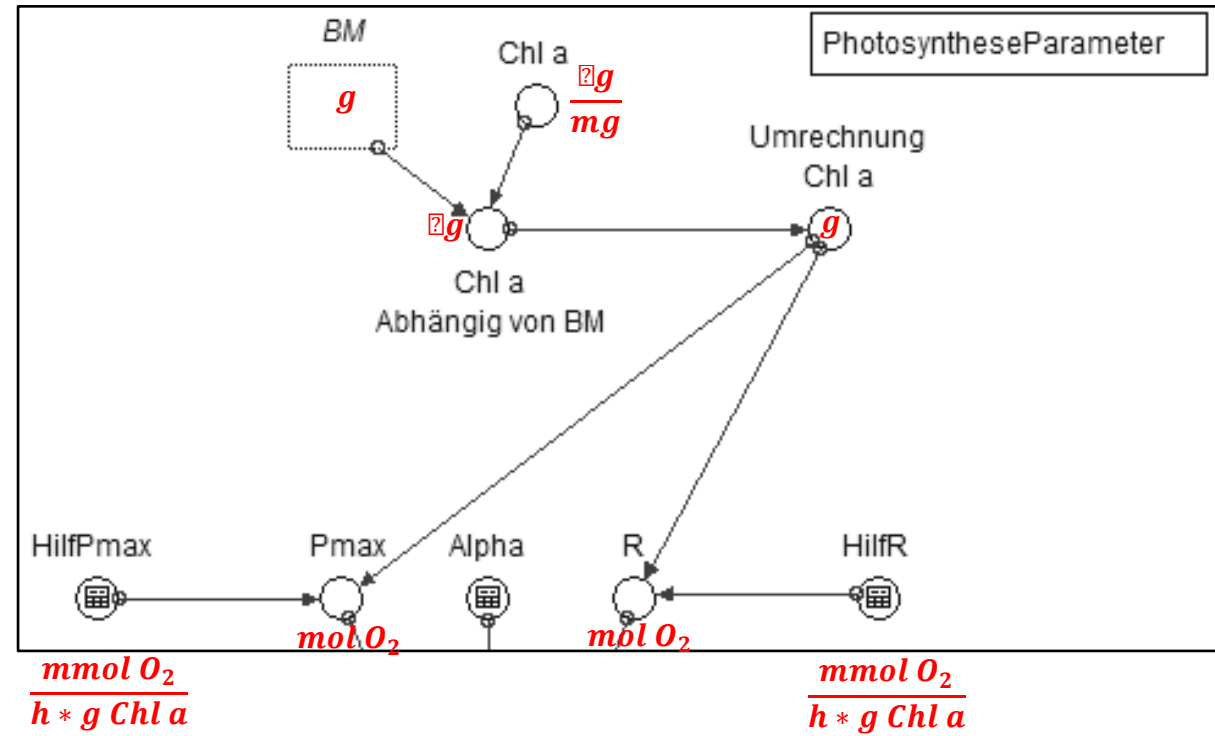
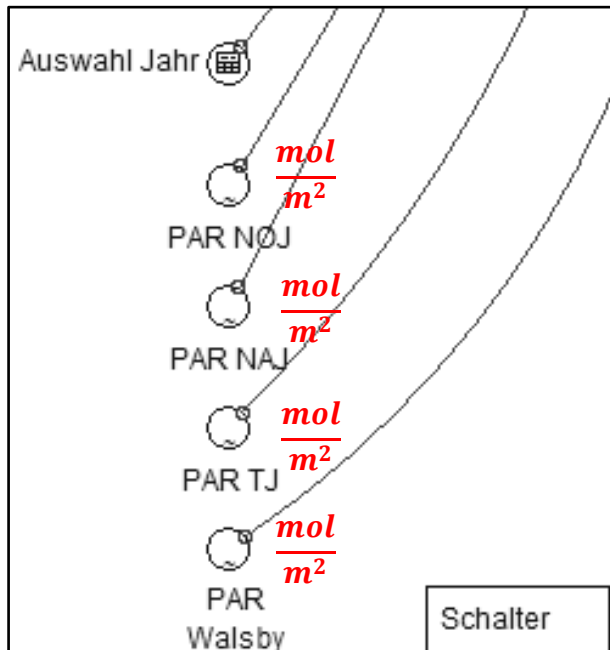
## Wachstumsbedingungen



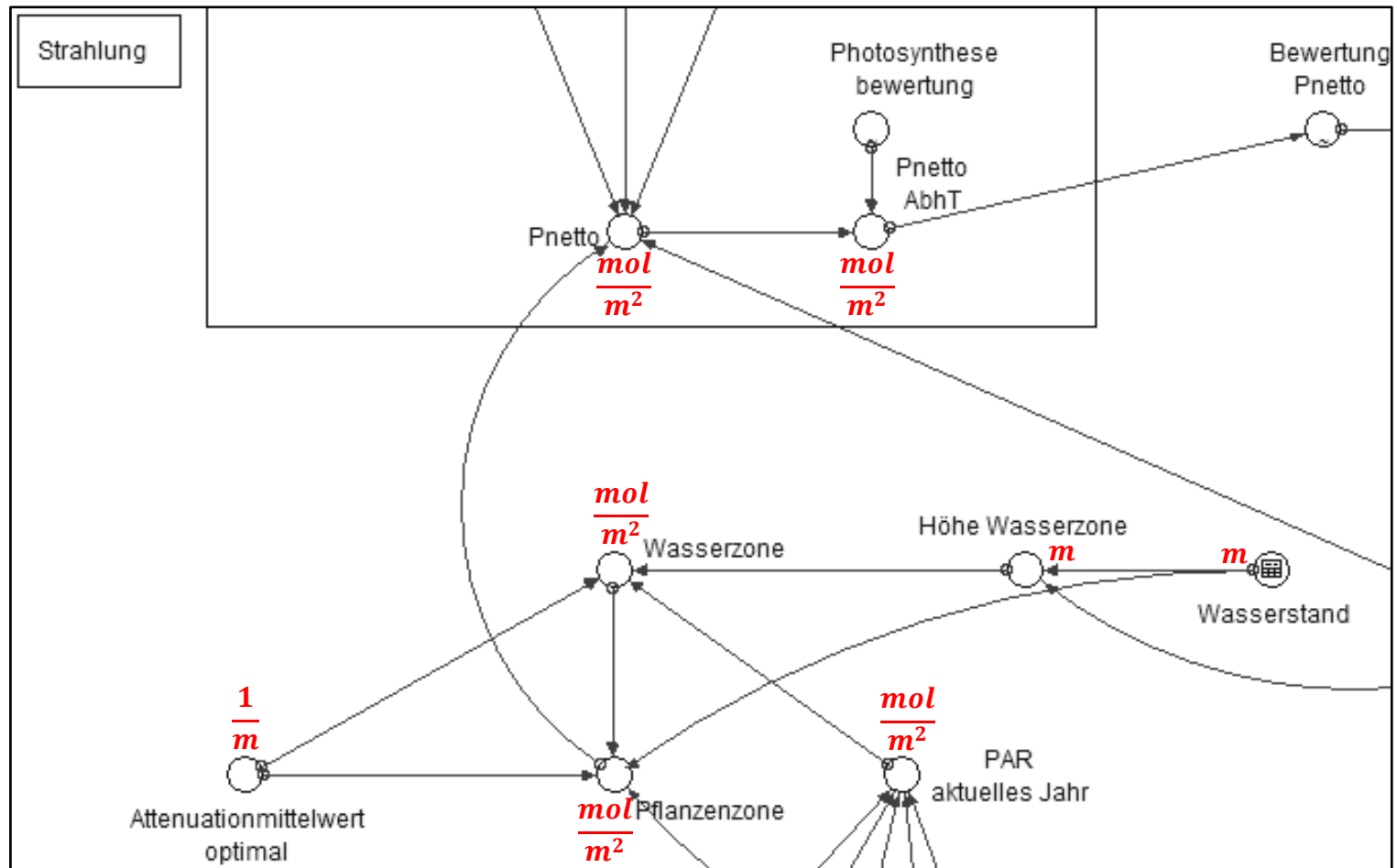
## Zuwachs



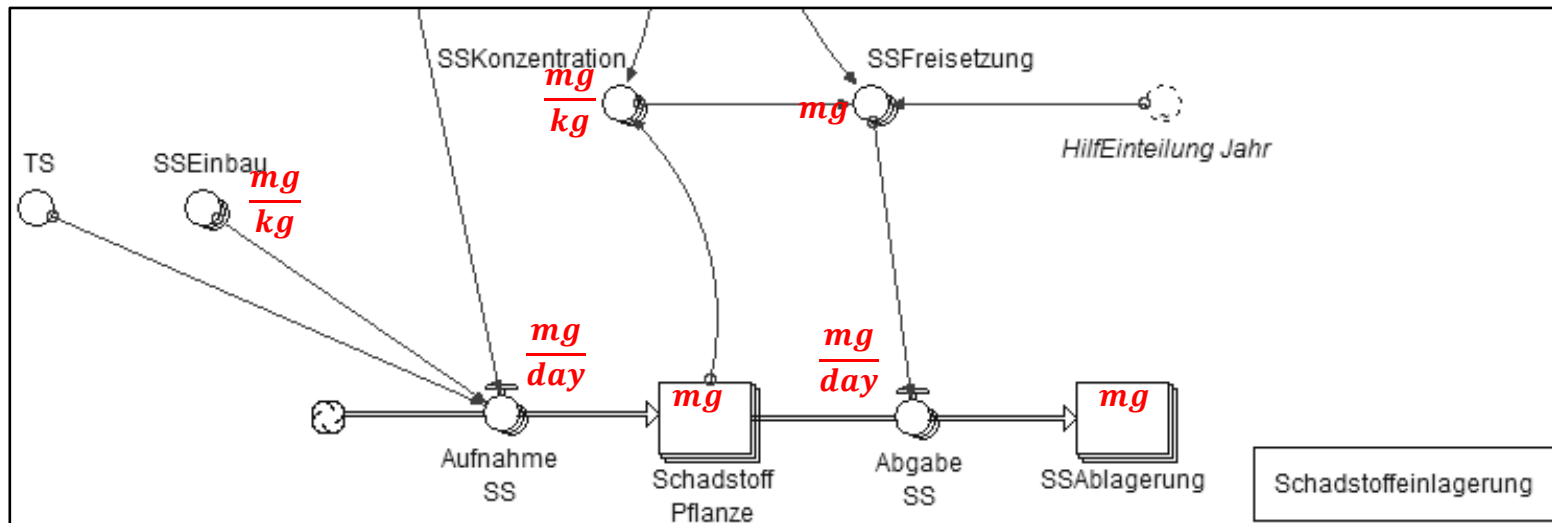
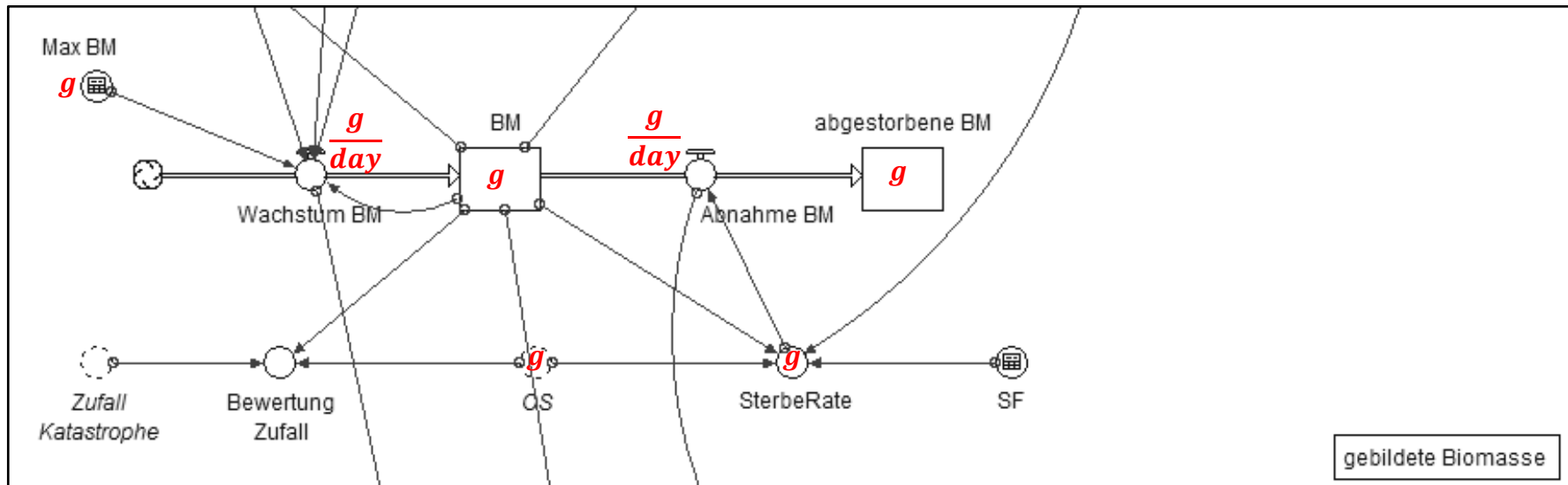
## Schalter und Fotosyntheseparameter



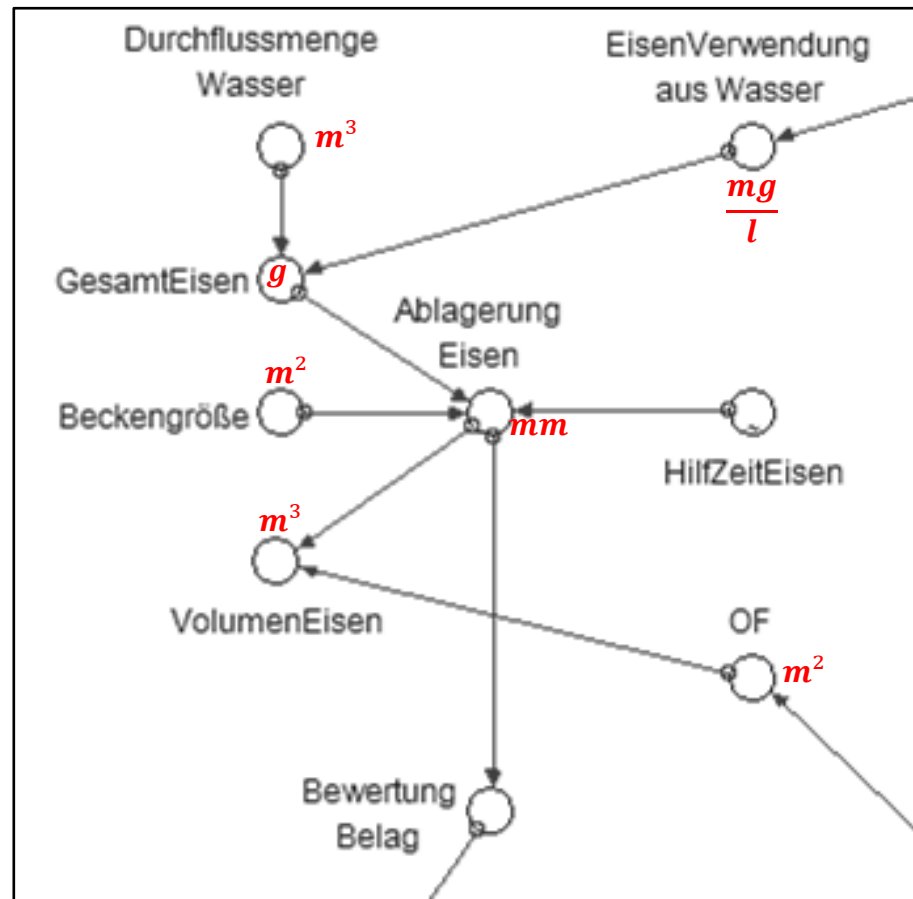
# Strahlung



## Gebildete Biomasse und Schadstoffeinträge



## Belag (Modellkonzept PBA)



## Anlage 2

### **Modellkonzept AZA.itm (es wird das Programm *iThink*<sup>®</sup> für das Öffnen einer \*.itm-Datei benötigt)**

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin

Gegebenenfalls muss beim Öffnen dieser Datei der Import verschiedener Daten erneut werden. Hierfür muss über die Registerkarte „*Edit*“ „*Manage Persistent Links*“ geöffnet werden. Anschließend muss im Bereich Import der angegebene Pfad mittels „*Edit*“ erneut werden, indem über *Browse* der Dateistandort der „*Import.xls*“ angegeben wird. Danach muss der benötigte „*Worksheet Name*“ ausgewählt werden: Für Modellkonzept AZA: iThink-WISVektor AZA. Die „*Data Orientation*“ ist die zweite Möglichkeit (Bezeichnungen vorn und Werte stehen in Spalten dahinter).

## **Anlage 3**

### **Datenbank des LfULG Sachsen für die Gewässerparameter**

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin



## **Anlage 4**

### **Wasserparameter des optimalen Standortes AZA**

Quelle: Dr. Sänger; Abschlussbericht 2008; Anlage 2

| <b>Parameter</b>                   |             | <b>AZA</b> |
|------------------------------------|-------------|------------|
| <b>pH-Feld</b>                     |             | 7,7        |
| <b>Eh_Feld</b>                     | <b>mV</b>   | 451        |
| <b>O2_Feld</b>                     | <b>mg/l</b> | 9,1        |
| <b>Na<sup>+</sup></b>              | <b>mg/l</b> | 11,3       |
| <b>K<sup>+</sup></b>               | <b>mg/l</b> | 1,6        |
| <b>Mg<sup>2+</sup></b>             | <b>mg/l</b> | 7,8        |
| <b>Ca<sup>2+</sup></b>             | <b>mg/l</b> | 33,4       |
| <b>Fe<sup>2+/3+</sup></b>          | <b>mg/l</b> | 0,06       |
| <b>Mn<sup>2+</sup></b>             | <b>mg/l</b> | <0,05      |
| <b>NH<sub>4</sub><sup>+</sup></b>  | <b>mg/l</b> | <0,1       |
| <b>Cl<sup>-</sup></b>              | <b>mg/l</b> | 2,3        |
| <b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b> | <b>mg/l</b> | 34         |
| <b>NO<sub>2</sub><sup>-</sup></b>  | <b>mg/l</b> | <0,01      |
| <b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>  | <b>mg/l</b> | <1         |
| <b>P<sub>ges</sub></b>             | <b>mg/l</b> | <0,04      |
| <b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> | <b>mg/l</b> | 122        |
| <b>CO<sub>3</sub><sup>2-</sup></b> | <b>mg/l</b> | <5         |
| <b>GH</b>                          | <b>°dH</b>  | 6,5        |
| <b>As<sup>4+</sup></b>             | <b>µg/l</b> | 38         |
| <b>Ba<sup>2+</sup></b>             | <b>µg/l</b> | 72         |

## **Anlage 5**

**Umrechnung der Daten vom deutschen Wetterdienst (DWD) (Normaljahr 1994 [NOJ 1994], Nassjahr 2002 [NAJ 2002] und Trockenjahr 2003 [TJ 2003]) im Vergleich zum Idealtagesgang von *Walsby***

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin

## **Anlage 6**

### **Idealtagesgangwerte von *Walsby* über ein ganzes Jahr (Walsby, 1997)**

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin

## Anlage 7

### **Modellkonzept PBA.itm (es wird das Programm *iThink*<sup>®</sup> für das Öffnen einer \*.itm-Datei benötigt)**

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin

Gegebenenfalls muss beim Öffnen dieser Datei der Import verschiedener Daten erneut werden. Hierfür muss über die Registerkarte „*Edit*“ „*Manage Persistent Links*“ geöffnet werden. Anschließend muss im Bereich Import der angegebene Pfad mittels „*Edit*“ erneut werden, indem über *Browse* der Dateistandort der „*Import.xls*“ angegeben wird. Danach muss der benötigte „*Worksheet Name*“ ausgewählt werden: Für Modellkonzept PBA: iThink-WISVektor PBA. Die „*Data Orientation*“ ist die zweite Möglichkeit (Bezeichnungen vorn und Werte stehen in Spalten dahinter).

## **Anlage 8**

### ***Walsby-Matrix*** (Walsby A. E., 1997)

Siehe CD – Bachelorarbeit Türke, Christin

## **Selbstständigkeitserklärung**

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und nur unter Verwendung der angegebenen Literatur und Hilfsmittel angefertigt habe.

Auerbach/Vogtland, August 2010

.....  
Christin Türke